

Tiago de Bittencourt Rossi

Sísmica de alta resolução sobre as rochas carbonáticas da
Formação Coqueiro Seco, Bacia de Sergipe-Alagoas:
Aquisição e processamento de dados

Dissertação de mestrado entregue à
coordenação do curso de mestrado em
Geologia Exploratória do Departamento de
Geologia da Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial para a
obtenção do grau de mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Augustinho Rigoti

Co-orientador:

Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

Curitiba

2007

Rossi, Tiago de Bittencourt

Sísmica de alta resolução sobre as rochas carbonáticas da Formação Coqueiro Seco, Bacia de Sergipe-Alagoas: aquisição e processamento de dados / Tiago de Bittencourt Rossi. - Curitiba, 2008.

59 f.: il., tabs, grafs.

Orientador: Prof. Dr. Augustinho Rigoti

Co-orientador: Prof. Dr Sidney Pires Rostirolla

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória. Inclui Bibliografia.

1. Método sísmico de reflexão. 2. Geologia – Processamento de dados. 3. Rochas carbonáticas. I. Rigoti, Augustinho. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 550.285

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao projeto SPHERA por ter possibilitado a realização deste mestrado, juntamente com a Petrobras, minha atual empregadora, pelo apoio financeiro sem o qual a etapa de campo não seria possível.

Ao Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla, pela oportunidade dada para mim. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Augustinho Rigoti por importantes auxílios no decorrer deste longo período.

Agradeço a todos pela paciência, porque esse longo período foi longo demais, sendo que levou alguns meses a mais do que deveria.

Agradeço minha família pelo apoio sempre presente, aos meus amigos Ary e Mezzomo pelo incentivo para terminar a dissertação e por estarem sempre por perto, mesmo nos tempos difíceis, que foram vários. À Eliana, que esteve sempre do meu lado mesmo que um tanto distante.

Agradeço aos geofísicos Thiago Nobre e Maurício Pedrassi da Petrobras, meus companheiros de curso de treinamento, que me auxiliaram nas etapas iniciais do processamento dos dados feito no PROMAX.

Agradeço em muito o Brunetta, que esteve sempre discutindo resultados e me orientando para qual lado ir no meio de um mar de seções sísmicas.

Agradeço também a muitas outras pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu terminasse a dissertação.

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT.....	IV
1-INTRODUÇÃO	1
1.1-LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIOGRAFICOS.....	1
2-OBJETIVOS	3
3-GEOLOGIA REGIONAL	4
3.1-BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS.....	4
3.1.1-Evolução geológica.....	4
3.1.2-Estratigrafia e arcabouço estrutural.....	4
3.1.2.1-Megasseqüência Paleozóica	6
3.1.2.2-Megasseqüência pré-rift	7
3.1.2.3-Megasseqüência Rift	7
3.1.2.4-Megasseqüência pós-rift	8
3.1.3-Formação Coqueiro Seco.....	9
4-AQUISIÇÃO DE DADOS.....	10
4.1-AMOSTRAGEM E RESOLUÇÃO ESPACIAL.....	12
4.2-AMOSTRAGEM TEMPORAL E RESOLUÇÃO VERTICAL.....	12
4.3-INTERVALO DA FONTE E STACKING DE TIROS.....	14
4.4-LOCAÇÃO DE LINHAS	14
4.5-O LEVANTAMENTO REALIZADO.....	15
5-PROCESSAMENTO.....	19
5.1-PROCESSAMENTO A	20
5.1.1- O sismograma e a convolução.....	24
5.1.1.1-Considerações sobre wavelets e fase	25
5.1.2-Deconvolução.....	26
5.1.3-Filtragem – FK.....	31
5.1.4-Análise de Velocidades	34
5.1.5-Empilhamento.....	38
5.1.6-FX Prediction.....	39
5.2-PROCESSAMENTO B.....	41
5.2.1-Preparação do dado.....	41
5.2.2-Deconvolução.....	41
5.2.3-Remoção de ruídos de baixa velocidade.....	43
5.2.4-Análise de velocidades.....	44
5.2.5-Empilhamento.....	46
5.3-PROCESSAMENTO C.....	48
5.3.1Deconvolução.....	49
5.3.2-Remoção de ruídos de baixa velocidade.....	50
5.3.3-Análise de velocidades.....	52
5.3.4-Empilhamento.....	52
6-DISCUSSÃO DE DADOS	54
7-CONCLUSÕES	57
8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

Índice de Figuras

Figura 1 – mapa de localização da Pedreira do Atol.	2
Figura 2 – carta estratigráfica da Bacia de alagoas (Feijó, 1994).....	5
Figura 3 – arcabouço estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas (Lana, 1990).	6
Figura 4 – geofone acoplado ao solo.	11
Figura 5 – detalhe do sistema usado em campo mostrando o sismógrafo, o cabo com saídas de conexão para geofones, o cabo de interface digital e a bateria que alimenta o sismógrafo.	11
Figura 6 – fotografia da principal frente de lavra da pedreira do Atol, mostrando em vermelho a localização da linha da Bancada.	16
Figura 7 – fotografia mostrando a superfície da bancada na qual foi levantada a linha homônima, durante a aquisição dos dados.	16
Figura 8 – na esquerda, tiro com 60 canais ativos e na direita com 120.	17
Figura 9 – fluxo de processamento A.	19
Figura 10 – fluxos de processamento B e C.	20
Figura 11 – Observar a boa consistência da marcação automática dos tempos de primeira chegada da refração com poucas marcações inconsistentes.	22
Figura 12 – controle estatístico das marcações de primeira quebra de refração. Cada quadrado é um tiro sendo a escala de cores o desvio padrão.....	23
Figura 13 – dado na esquerda com 1000ms e na direita com 500ms. Economia de espaço e tempo sem perda de dado útil para o objetivo do estudo.	24
Figura 14 – representação linear de um sistema com fonte e receptores pontuais em um meio elástico, isotrópico, homogêneo e infinito (adaptado de Ziolkowski, 1983).	25
Figura 15 – da esquerda para a direita: wavelet original, rotação de 90° aplicada tornando-a assimétrica e rotação de 180° invertendo sua polaridade.	25
Figura 16 – <i>Wavelets</i> com mesmo espectro de amplitude e diferentes fases, de acordo com a posição da maior quantidade de energia (adaptado de Yilmaz, 2001).	26
Figura 17 – fluxo usado para a deconvolução <i>spiking</i> , mostrado junto com a janela de inserção de parâmetros.	28
Figura 18 – figura mostrando na esquerda sismogramas e na direita seus respectivos espectros de frequência. O traço preto indica o valor máximo de frequência e o azul o valor médio. Observar a eficiência na aplicação da deconvolução <i>spiking</i> , variando o comprimento do operador: A) dado bruto; B) 10ms; C) 50ms; e D) 150ms. Observa-se a melhora na recuperação de altas frequências com o aumento do comprimento de operador.	29
Figura 19 – desenho esquemático de como ocorre o fenômeno da reverberação. $V1 < V2 < V3$	30
Figura 20 – fluxo usado para a deconvolução preditiva, mostrado junto com a janela de inserção de parâmetros.	30
Figura 21 – na esquerda o dado bruto e na direita o dado após o processo de deconvolução.	31
Figura 22 – dado pós deconvolução, com o seu espectro FK abaixo já com um filtro desenhado. O filtro é a porção sombreada mais escura da figura, sendo que os valores dentro da área sombreada serão rejeitados.	32
Figura 23 – fluxo de filtragem FK, com a janela de inserção de parâmetros e janela de visualização do filtro aplicado.	33

Figura 24 – dado antes (esquerda) e depois (direita) da filtragem FK. Nota-se a grande redução de ruídos de baixa velocidade.	34
Figura 25 – fluxo usado para gerar os painéis CVS, as janelas de <i>Common Offset Gathers</i> e de <i>semblance</i>	35
Figura 26 – ferramenta de análise de velocidades interativa. Observam-se as janelas de <i>semblance</i> (esquerda), <i>common offset gathers</i> (centro) e painéis CVS (direita).	36
Figura 27 – painéis com dado empilhado com velocidade constante. O painel A foi empilhado com 1000m/s e o painel B com 2000m/s.	37
Figura 28 – fluxo usado para geração dos painéis CVS.	37
Figura 29 – fluxo usado para empilhar o dado. Observam-se os ícones de processo de NMO e de empilhamento por CMP (CmpStk) separados.	38
Figura 30 – seção sísmica empilhada. Na parte superior a visualização de traços (<i>wiggle/variable área</i>) e na inferior a visualização de escala de cores (<i>variable density</i>).	39
Figura 31 – seção sísmica com o dado após a aplicação do <i>FX prediction</i> , mostrada de 0ms até 150ms.	40
Figura 32 – visão de detalhe mostrando em cima dado com <i>FX prediction</i> e embaixo dado sem a aplicação do processo.	40
Figura 33 – CMPs mostrando a influencia da deconvolução SCD no dado. Acima dado bruto, abaixo dado com deconvolução aplicada.	42
Figura 34 – tiro com <i>mute</i> aplicado.	43
Figura 35 – espectro FK de um tiro do dado deconvolvido. O polígono desenhado é a área de rejeição do filtro.	44
Figura 36 – ferramenta para análise de velocidades do PROMAX, muito semelhante à do VISTA.	45
Figura 37 – Campo de velocidades definido para empilhamento.	45
Figura 38 – tela do fluxo usado para empilhamento, dentro do ambiente PROMAX.	46
Figura 39 – seções empilhadas do processamento B. A) seção empilhada do dado com <i>mute</i> ; B) seção empilhada do dado com filtragem FK.	48
Figura 40 – acima CMPs do dado bruto, abaixo os mesmos CMPs do dado após a deconvolução <i>wavelet</i>	50
Figura 41 – CMPs com dado pós-deconvolução e <i>radial filter</i> aplicado.	52
Figura 42 – seção empilhada obtida ao final do processamento C.	53
Figura 43 – figura mostrando seção sísmica (acima), a foto da bancada sobre a qual a linha aqui processada foi adquirida (meio) e um desenho esquemático indicando a posição de lentes de folhelho (abaixo).	56

Resumo

Foram desenvolvidas no âmbito dessa dissertação duas tarefas distintas, porém intrinsecamente conectadas, uma foi a aquisição de dados sísmicos e outra foi o processamento desses dados. A etapa de aquisição foi realizada dentro da cava da pedreira do Atol, no município de São Miguel dos Campos, estado do Alagoas e teve como alvo as rochas carbonáticas da Formação Coqueiro Seco. Esta área foi escolhida por apresentar afloramentos de rochas análogas às rochas da Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos. A aquisição dos dados foi toda realizada em uma única etapa de campo, onde foram adquiridas diversas linhas de sísmica de reflexão e de refração. Destas linhas, essa dissertação está focada apenas na linha que chamamos de Bancada. Foi levantada sobre uma bancada da cava na direção aproximadamente N-S acompanhando a direção *strike* das camadas. Foi levantada usando 144 geofones plantados, sendo que 120 estavam ativos. O espaçamento entre os geofones foi de 0.5 metro, mesmo espaçamento usado para pontos de tiro. A fonte teve um *near offset* de 7.25 metros, fazendo os tiros caírem entre estações. O tempo de registro foi de 1 segundo e a razão de amostragem de 0.5 milissegundos. A etapa de processamento teve foco na recuperação de altas frequências para melhoria de resolução e eliminação da onda direta que fortemente afeta o dado. Para a etapa de processamento foram usados dois pacotes de *softwares* de processamento diferentes e três fluxos de processamento distintos: A, B e C. O fluxo de processamento A foi feito usando o software VISTA, e teve como passos principais da filtragem a deconvolução preditiva e a filtragem FK. Os fluxos B e C foram realizados com o programa de computador PROMAX, sendo que B teve caráter semelhante ao fluxo A porém fez uso de deconvolução de consistência superficial, além da filtragem FK. Já o fluxo C foi diferente, usando o *Radial Filter* e deconvolução *wavelet*. Apesar de esforços e uso de diferentes abordagens para o mesmo problema, os resultados dos processamentos mostram que, mesmo com um equipamento moderno e parâmetros de campo adequados, a identificação de refletores correlacionáveis com a geologia local é difícil.

Abstract

Within the scope of this thesis two different tasks were developed, but while different they were intricately connected. One was the acquisition of shallow high resolution seismic data and the other was the processing of these data. The data acquisition was undertaken inside the open pit mine Atol, near the city of São Miguel dos Campos, in Alagoas state, and had as target the carbonatic rocks of Coqueiro Seco Formation of the Sergipe-Alagoas Basin. This area was chosen for presenting outcropping rocks that are analogous to the Lagoa Feia Formation. This survey was completed in a single field trip, during which were also acquired several other seismic reflection and refraction lines. Of all the acquired seismic lines, this dissertation is focused on the one that is called Bancada's line. It was acquired on top of a pit bench and had approximately the N-S direction, following the layer's strike. In the field 144 geophones were used, being 120 of these active during most of the survey. The geophone's spacing was 0.5 meter and the same was used for source spacing. The source had a near offset of 7.25 meters, thus the shots fell in the middle of the geophone's spacing. The recording time was 1 second and the sample rate was 0.5 milliseconds. Data processing aimed at enhancing high frequencies in order to make resolution better and at eliminating head waves that strongly affected the data. Two different computer softwares were used to process the data, and three different workflows were used: A, B and C. Workflow A used the software VISTA and had as main steps the predictive deconvolution and FK filtering. Workflows B and C used another software called PROMAX, and B had a similar character to A, but it differs in that it used surface consistent deconvolution. Workflow C was different, using a radial filter instead of FK and a wavelet deconvolution. Despite all efforts and the use of different approaches to the same problem, the results of all processing workflows show that even with the high technology equipment and adequate field parameters used, identifying reflectors that may be correlated to the local geology is not easy.

1-Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no contexto do projeto SPHERA – Simulação de Parâmetros Hidráulicos em Reservatórios Análogos – como trabalho de base, visando fornecer dados sísmicos de alta resolução para basear sistemas de simulação de fluxos em conjunto com outras informações. Trata da aquisição e processamento de dados sísmicos de alta resolução adquiridos na Pedreira do Atol, localizada no município de São Miguel dos Campos no estado do Alagoas. Esta aquisição foi feita no período de 19/03/2006 até 21/04/2006.

A área de estudos, Pedreira do Atol, é uma pedreira de extração de rochas calcárias para produção de concreto, onde afloram rochas da Formação Coqueiro Seco, em especial do Membro Morro do Chaves, dentro da Bacia de Sergipe-Alagoas. Essa área foi escolhida por apresentar afloramentos de rochas que foram tomadas como análogas às rochas da Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos. Como se observa na literatura (e.g. Wang et al. 1998a e b; Appi, C.J. e Rostirolla, S.P., 2004), o estudo de afloramentos análogos é provavelmente a maneira mais eficaz de aprimorar o conhecimento geológico-estrutural sobre reservatórios. A própria experiência do grupo de pesquisa ligado ao Laboratório Análise de Bacias e Petrofísica - LABAP da UFPR, que desenvolveu estudo de análogos aos potenciais reservatórios do Grupo Itararé, Bacia do Paraná, atesta esta eficácia (e.g. Lonardelli et al. 2003; Campos et al. 2003; Brunetta et al. 2004; Appi, C.J. e Rostirolla, S.P., 2004).

O presente trabalho apresenta métodos usados na aquisição e processamento de sísmica de alta resolução, tratando especialmente da deconvolução e de sua relação com a fase do dado original.

1.1-Localização e aspectos fisiográficos

A pedreira está localizada nas coordenadas UTM 8920142N e 812233E dentro do município de São Miguel dos Campos, no Estado do Alagoas (Figura 1). Dista aproximadamente 60km da cidade de Maceió, capital do estado, e 30km da cidade de Barra de São Miguel, localidade base da equipe sísmica. O acesso principal é a rodovia

BR-101, indo no sentido Maceió – São Miguel dos Campos, pega-se uma saída à direita em uma estrada de terra cerca de 3km antes da entrada de São Miguel dos Campos.

O relevo da região apresenta extensas regiões planas, sem elevações salientes, com altitude máxima raramente passando dos 120m. Esses planaltos são cortados por vales profundos, estando a pedreira localizada dentro de um deles (Figura 1). Está a uma altitude média de 20m acima do nível do mar, sendo localizada dentro de um vale, no fundo do qual afloram as rochas em questão. A borda do vale é, em geral, escarpada e apresenta afloramentos das rochas da Formação Barreiras, do Terciário.



Figura 1 – mapa de localização da Pedreira do Atol.

2-Objetivos

Esse trabalho teve como objetivo adquirir e processar linhas sísmicas de reflexão de alta resolução sobre rochas carbonáticas da Formação Coqueiro Seco da Bacia de Sergipe-Alagoas, sendo análoga à Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos, gerando conhecimento geológico de detalhe sobre afloramentos análogos a reservatórios em rochas carbonáticas.

Mais especificamente objetiva-se:

- Obtenção do domínio da técnica do método geofísico de sísmica rasa por parte do mestrando, que deverá contribuir também para o aprimoramento técnico desta área no projeto SPHERA e na UFPR;
- Gerar importante informação que subsidiará os estudos de modelagem de situação geológica análoga a reservatório em rochas carbonáticas;
- Gerar novos dados de sísmica rasa que poderão ser comparados aos já levantados pela UFPR em outros ambientes geológicos.

3-Geologia regional

3.1-Bacia de Sergipe-Alagoas

A bacia localizada na costa nordeste brasileira nos estados de Sergipe e Alagoas, ocupa, na porção terrestre, uma faixa estreita e alongada com largura média de 35km e comprimento de 350km. Situada entre os paralelos 9° e 11°30'S, tem 34600km² até a isóbata de 2000m, sendo que 12000km² desse total referem-se à porção em terra e o restante (22500km²) à porção marinha. Limitada a norte pela plataforma de Pernambuco-Paraíba, onde se depositou pequeno volume sedimentar durante o Neocretáceo-Terciário. Ao sul, a plataforma de Estância separa-a da Bacia de Bahia Norte (Lana, 1990).

3.1.1-Evolução geológica

Segundo Lana (1990), sua implantação começou no Jurássico, quando sedimentos fluviais preencheram uma sinéclise pré-rift intracratônica permiana. A fase rift, neocomiana-barremiana, caracterizou-se por sistemas continentais e lacustres depositados em uma série de meios-grabens antitéticos, gerados por um sistema de falhamentos principal norte-sul. Com a efetiva separação continental entre as placas africana e sul-americana, a fase pós-rift foi iniciada por sedimentos continentais e marinhos restritos do Andar Alagoas. Tectonismo deformacional e erosão regional instalaram uma zona de charneira, seguindo-se o desenvolvimento de uma plataforma carbonática albo-cenomaniana sotoposta a um sistema de plataforma clástico-carbonática e talude que se desenvolve até o recente.

3.1.2-Estratigrafia e arcabouço estrutural

Muitos trabalhos tratam da estratigrafia da Bacia de Sergipe-Alagoas (Figura 2), embora muitos deles sejam relatórios internos não publicados da PETROBRÁS. Dentre os publicados, Ven *et al* (1989) tratam da sua estratigrafia e arcabouço estrutural de forma bastante completa. Estes autores separam os sedimentos da bacia em quatro

megassequências, principalmente, por discordâncias regionais, com mudanças nítidas na sedimentação e no estilo tectônico associado. Isso foi resultado da separação continental afro-sulamericana e formação do Atlântico Sul.

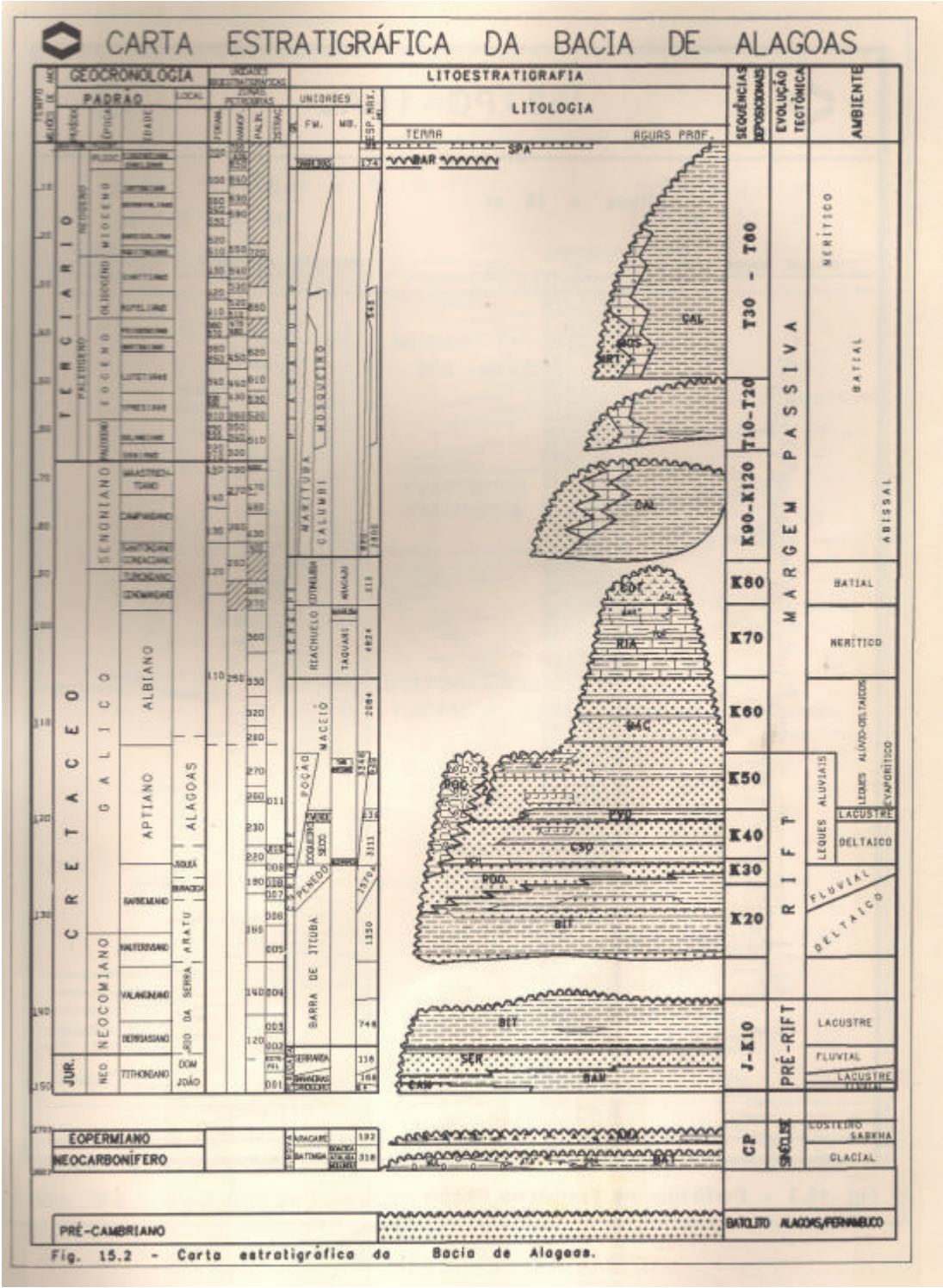


Figura 2 – carta estratigráfica da Bacia de Alagoas (Feijó, 1994).

O arcabouço estrutural da bacia, como hoje se apresenta, é constituído por falhamentos principais norte-sul, interceptados por falhas leste-oeste e nordeste-sudoeste, que dão à bacia uma configuração geral NE-SW (Figura 3). A evolução deste arcabouço foi determinante na localização dos depocentros e tipos de sistemas deposicionais que os preencheram. A arquitetura deste arcabouço pode ser descrita através das várias formas sob as quais ele se apresentou ao longo do tempo geológico. Os mecanismos e regimes de esforços responsáveis pela evolução tectônica da Bacia de Sergipe-Alagoas constituem um dos maiores temas de debate entre seus estudiosos. O rifteamento da bacia é compatível com modelos evolutivos tradicionais, que assumem movimentos distensivos, resultantes de esforços transtensionais.

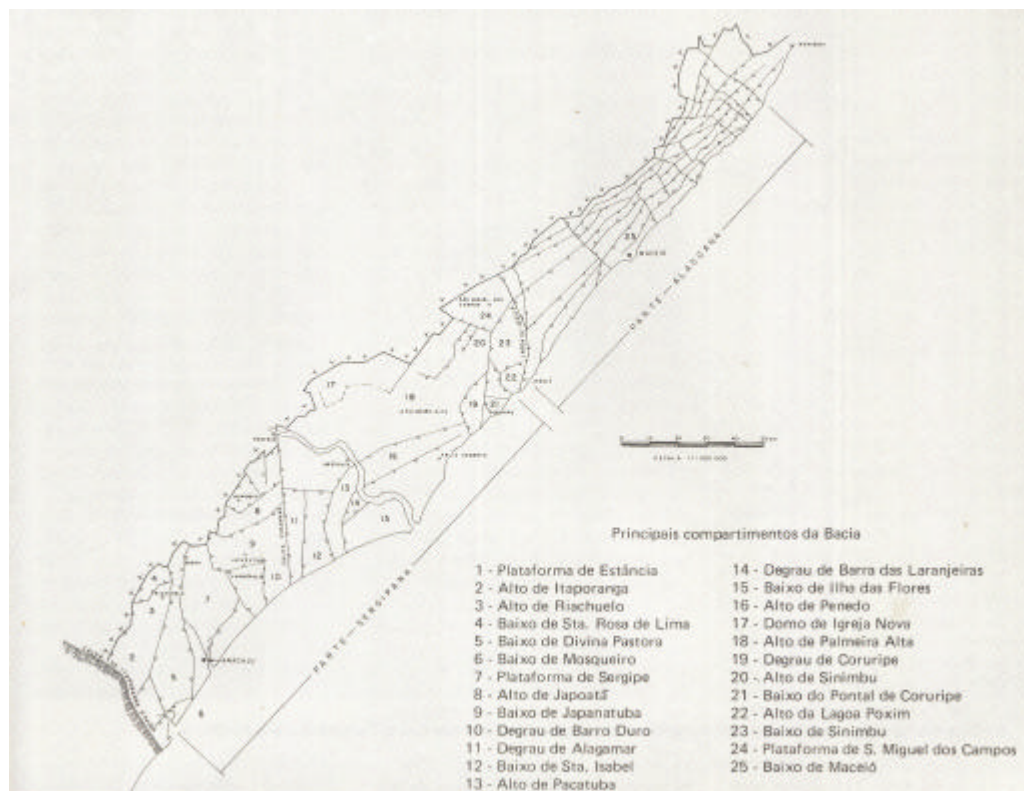


Figura 3 – arcabouço estrutural da bacia de Sergipe-Alagoas (Lana, 1990).

3.1.2.1-Megasseqüência Paleozóica

Essa megasseqüência depositada sobre o embasamento Pré-cambriano em condições intracratônicas, é representada por um pacote Permo-Carbonífero (formações

Batinga e Aracaré). A Formação Batinga, carbonífera, está inserida em ambientes glacial, fluvial e marinho, enquanto a Formação Aracaré, permiana, representa ambiente marinho raso a litorâneo, localmente desértico e sabkha.

3.1.2.2-Megassequência pré-rift

Após um período de erosão e/ou não deposição, que dura todo o Triássico, teve início a deposição de um pacote intracontinental terrígeno, jurássico, formado por folhelhos vermelhos, lacustres, da formação Bananeiras e arenitos fluviais das formações Serraria e Candeeiro. A sedimentação pré-rift processou-se em sinéclise intracratônica, cujo depocentro, na Bacia de Sergipe-Alagoas, localizou-se na atual porção nordeste do Alto de Aracaju. A bacia pré-rift estendia-se até as bacias de Recôncavo e Gabão. A seção jurássica exibe feições estruturais de porte modesto.

3.1.2.3-Megassequência Rift

A fase rift, neocomiana-barremiana, foi fortemente controlada pelo desenvolvimento de um sistema de falhamentos principal norte-sul, interceptado por falhas leste-oeste, que gerou um arcabouço regional composto por meios-grabens em echelon, antitéticos, subparalelos entre si, que dão à bacia uma direção geral NE-SW. O depocentro principal localizou-se em Sergipe e, gradualmente, a sedimentação foi se deslocando para Alagoas, onde atingiu seu ápice.

A deposição inicial, no Andar Rio da Serra, foi caracterizada por uma seção pelítica, lacustre, com esparsos corpos arenosos da formação Barra de Itiúba. Em direção ao topo, grada para um pacote eminentemente deltáico com aumento na razão arenito/folhelho. A medida em que as sub-bacias foram assoreadas, os rios progradaram sobre antigas zonas deltáicas depositando os arenitos fluviais da Formação Penedo. Contemporaneamente, nas porções proximais, em um sistema de leques aluviais provenientes da borda soerguida da bacia depositaram-se os conglomerados e arenitos grosseiros da Formação Rio Pitanga. No Andar Jiquiá, renunciando a abertura continental, ocorreram os arqueamentos do embasamento, identificáveis em mapas de superfície, subsuperfície ou de subafloramentos da discordância do final do rift, bem

como em seções sísmicas. Associados a altos dessa natureza formaram-se campos de óleo e gás como os de Carmópolis, Riachuelo, São Miguel dos Campos e outros. No extremo norte da porção alagoana da bacia, estes arqueamentos foram mais tardios ocorrendo já no tempo Alagoas. São dessa fase tectônica, por exemplo, as estruturas de grande porte na coluna sedimentar alagoana. A sedimentação Jiquiá foi mista, com os clásticos terrígenos flúvio-deltáicos da Formação Coqueiro Seco e bancos carbonáticos desenvolvidos em altos síncronos constituindo o Membro Morro do Chaves. Esta fase foi encerrada com soerguimento e erosão regional da bacia, informalmente denominada de “discordância pré-aptiana” ou “discordância pré-Alagoas superior”.

Teve especial importância no tectonismo Jiquiá a incipiente instalação da Linha de Charneiras Alagoas (LCA), cuja implantação foi melhor definida na fase pré rift.

3.1.2.4-Megassequência pós-rift

A megassequência pós-rift compreende a fase final de ruptura continental e inserção da crosta oceânica do Atlântico, abrangendo do Andar Alagoas ao Recente.

No Andar Alagoas, a ação divergente entre placas sulamericana e africana e a conseqüente aceleração na taxa de subsidência térmica, resultaram na formação da grande LCA, principal feição do arcabouço estrutural da bacia a partir desta fase. A implantação da LCA causou sensível alteração na fisiografia e no estilo tectônico da bacia. O tectonismo radicado no embasamento da fase anterior passou a ser de natureza adiastrófica, de fluxo gravitacional, nucleado em evaporitos da Formação Muribeca. Os depocentros controlados pelo sistema de meios-grabens, durante a fase rift, deslocaram-se para novos compartimentos a leste, controlados por falhas leste-oeste e pelo antigo sistema dominante de falhas norte-sul. As sub-bacias assim formadas passaram a controlar a natureza e a distribuição dos sistemas deposicionais.

Na fase de mar restrito, que encerra o Andar Alagoas e parte do Albiano inicialmente depositaram-se no bloco alto da LCA, em Sergipe, os conglomerados basais Membro Carmópolis encaixados em páleo-vales escavados pela discordância pré-Alagoas superior. Seguiu-se a deposição dos evaporitos do Membro Ibura e carbonatos e folhelhos do Membro Oiteirinhos, todos da Formação Muribeca. A porção alagoana da bacia já se manifestava como área positiva, desenvolvendo arenitos flúvio-deltáicos do Membro Maceió com raras e delgadas camadas de sal.

Do Albiano ao Santoniano, com o rompimento das barreiras de restrição, ocorreu a instalação de condições de mar aberto e o desenvolvimento dos sistemas de plataformas e taludes carbonáticos das formações Riachuelo e Cotinguiba. Com a aceleração do processo de subsidência térmica, ocorre a reativação das áreas fonte, introduzindo na bacia, a partir do Campaniano, um sistema de plataforma clástico-carbonática (Membro Marituba) e talude clástico (Membro Calumbi) da Formação Piaçabuçu. Nas partes mais profundas, a taxa de subsidência superou o aporte sedimentar e o sistema de talude do Membro Calumbi foi transgressivo retrogradante. A deposição da Formação Piaçabuçu cretácica foi encerrada por uma desconformidade regional.

A Formação Piaçabuçu terciária caracterizou-se como fase de assoreamento final da bacia, através da progradação de arenitos costeiros e calcários de plataforma rasa do Membro Marituba e folhelhos de talude e arenitos turbidíticos do membro Calumbi.

3.1.3-Formação Coqueiro Seco

Feijó (1994) descreve a Formação Coqueiro Seco como alternâncias monótonas de arcóseo fino a grosso, acastanhado, micáceo e folhelho siltico acastanhado. A Formação Morro do Chaves foi rebaixada para Membro da Formação Coqueiro Seco, designando os calcirruditos e pelecípodes presentes na base da unidade ou próximo a ela, em partes das bacias de Sergipe e Alagoas. A Formação Coqueiro Seco sobrepõe-se concordantemente à Formação Penedo e está sotoposta, também concordantemente às formações Ponta Verde e Maceió. Grada lateralmente para a Formação Rio Pitanga na Bacia de Sergipe, e para a Formação Poção a Bacia de Alagoas. Os estratos dessa unidade foram depositados por deltas curtos em ambiente lacustre no Eoaptiano, a julgar pelas datações baseadas em ostracodes não marinhos e palinórfos.

4-Aquisição de dados

Para a aquisição de dados, utilizou-se a técnica CMP (Common Mid Point). Essa técnica consiste em amostrar várias vezes o mesmo ponto em subsuperfície e gera um aumento da razão sinal ruído após o processamento dos dados. Dessa maneira, após a correção NMO (Normal Move Out), as amostras redundantes de um único ponto serão somadas fazendo com que amplitudes coerentes se somem e amplitudes incoerentes se subtraíam, aumentando a razão sinal/ruído. Frequentemente essa técnica é chamada de CDP (Common Depth Point), mas esse termo está caindo em desuso e é somente correto se o levantamento estiver sendo realizado sobre estratos horizontais e plano paralelos, o que dificilmente é o caso.

O número de amostras do mesmo ponto é conhecido como cobertura ou multiplicidade. Se o ponto em subsuperfície é amostrado somente uma vez, diz-se que sua cobertura foi de 1, se duas vezes 2 e assim por diante. A multiplicidade de uma linha sísmica de reflexão pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$\text{Multiplicidade} = (N/2n),$$

onde N é o número de geofones ativos no arranjo e n o intervalo de deslocamento da fonte, expresso em número de intervalos de geofones. Nesse ponto é bom frisar que geofones, estações, receptores e canais são sinônimos, uma vez que não foram usados arranjos de geofones.

O equipamento existente para aquisição sísmica de propriedade da UFPR, sob responsabilidade do LABAP – Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica, disponibilizado para este trabalho, consiste em um sistema da marca Geometrics, com seis sismógrafos GEODE de 24 canais cada. Os geofones utilizados (Figura 4) são geofones verticais de 14Hz de frequência fundamental e resposta plana acima desta frequência, com spikes de 15cm. Os geofones são conectados aos sismógrafos por cabos com saídas de conexão a cada 10m, sendo este o espaçamento máximo possível com estes cabos.



Figura 4 – geofone acoplado ao solo.

Os sismógrafos podem operar independentemente ou em conjunto, sendo conectados por cabos de interface digital (Figura 5) com 250m de comprimento. Com isso teríamos uma configuração máxima de 144 canais, com um espaçamento máximo de 10 m entre cada canal, nos dando um arranjo fixo possível de 1440m de comprimento.

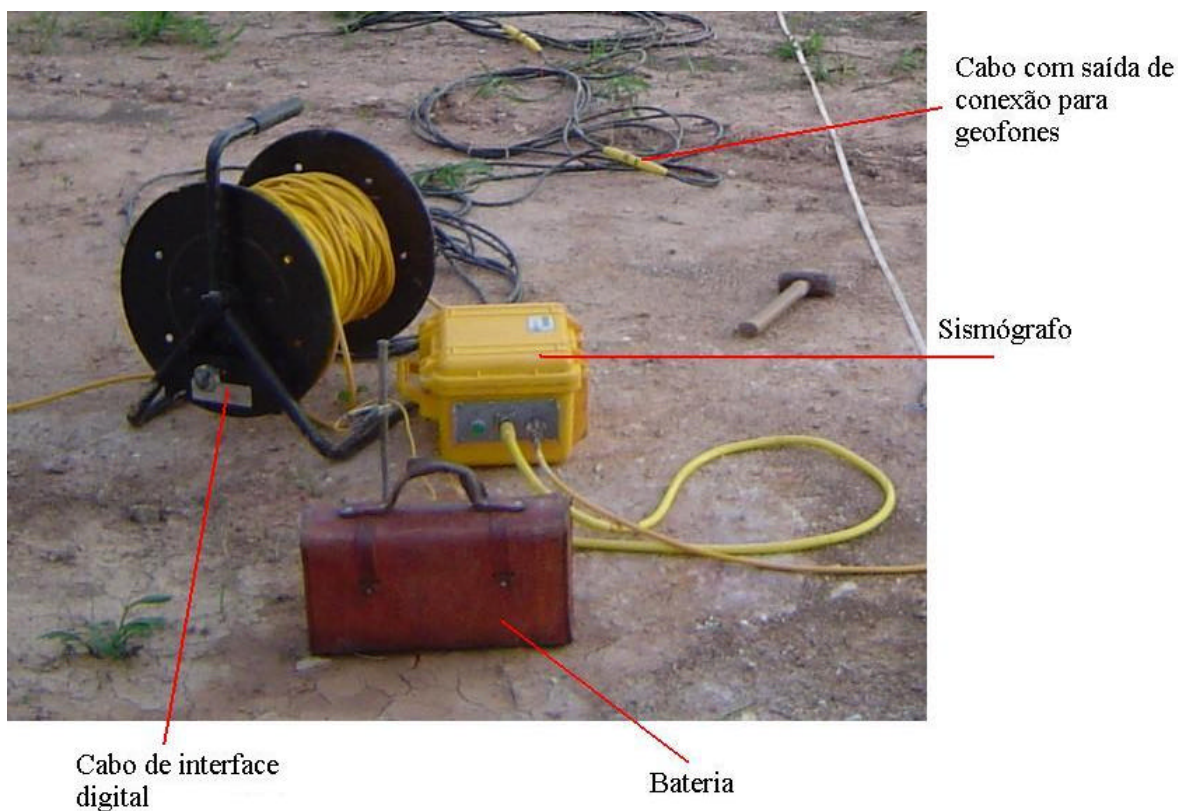


Figura 5 – detalhe do sistema usado em campo mostrando o sismógrafo, o cabo com saídas de conexão para geofones, o cabo de interface digital e a bateria que alimenta o sismógrafo.

Tem-se como regra básica que a profundidade máxima de investigação é aproximadamente igual ao tamanho do lanço (arranjo somado com o *near offset* usado). Com isso, sabendo a profundidade de investigação necessária, pode-se dimensionar o arranjo, dentro do parâmetro máximo mostrado acima, contando ainda com o afastamento da fonte até o primeiro receptor (*near offset*). Tendo em mente o alvo, com profundidade definida e geometria conhecida pode-se iniciar a parametrização da linha.

4.1-Amostragem e resolução espacial

O arranjo montado amostra espacialmente a onda que se propaga em subsuperfície em uma distância entre geofones (I_e) em metros.

O teorema de amostragem uniforme que diz que se $f(t)$ é limitado a f_m Hz (frequência máxima absoluta), então $f(t)$ é completamente caracterizado por amostras extraídas em intervalos uniformes menores que $1/(2 f_m)$ segundos (Stone, 1994). A partir daí, colocando um componente de velocidade na fórmula para dar uma noção de distância e proporção para um comprimento de onda, obtemos:

$$S_{\min} = V/(2 f_m),$$

onde V é a velocidade da onda propagante, S_{\min} é o menor intervalo de amostragem espacial e $S_{\min} = I_e$.

Muitas vezes não se têm dados de velocidade ou de frequência esperada do alvo. Nesses casos, a partir da espessura do alvo - E_a - (contando que ele seja horizontal) define-se o espaçamento entre geofones (I_e) com no máximo $E_a/2$. É importante lembrar que diminuindo o I_e diminui-se também o tamanho total do lanço, perdendo em profundidade de investigação.

4.2-Amostragem Temporal e Resolução Vertical

Amostrar o dado de forma correta temporalmente também é muito importante. Essa amostragem temporal é representada pela taxa de amostragem e pelo tempo de registro. A taxa de amostragem temporal é bastante importante, pois é ela quem vai determinar a frequência de Nyquist (F_N), que é a frequência acima da qual ocorre o

falseamento de frequências por amostragem incorreta, também chamado de efeito *alias*. Pode-se usar a fórmula

$$\text{Razão de amostragem} = 0.5/F_{\max}$$

para se calcular a taxa de amostragem. Porém, como esse é um parâmetro escolhido no início da aquisição, quando raramente se tem informações sobre frequência, costuma-se atribuir um valor bastante baixo quando se trata de sísmica de alta resolução, como 0.5ms ou até 0.25ms. O equipamento disponível permite usar até 20.833 μ s, porém esse valor levaria a frequência de Nyquist até 24000Hz, o qual é um valor desnecessariamente grande.

Já o tempo de registro é um parâmetro que não afeta a qualidade do dado, porém se for mal dimensionado, pode resultar em amostragem insuficiente para registrar determinado evento sísmico, ou um arquivo desnecessariamente grande. Como o tempo de registro é basicamente uma função da profundidade e velocidade até a profundidade máxima investigada pelo arranjo, tem-se uma fórmula simples para calculá-lo:

$$\text{Tempo de registro} = T_d + 2 * L$$

onde T_d é o tempo duplo até a profundidade máxima a ser investigada e L é o comprimento temporal do maior filtro de processamento que se pretende utilizar. Normalmente o valor de 200ms é suficiente para L . Usando como exemplo uma das linhas do levantamento objeto do presente estudo, tem-se uma profundidade de investigação máxima em torno de 70m com uma velocidade média até ela de 2250m/s, resultando:

$$\text{Tempo de registro} = 62.2 + 2 * 200,$$

que requer um tempo de registro de 464.2ms. Logo, arredondar esse tempo para 500ms seria suficiente. Porém, como precaução extra pelo fato de o levantamento estar sendo realizado numa área desconhecida pela equipe, foi usado 1s, que posteriormente foi visto desnecessário e o dado cortado para 500ms.

4.3-Intervalo da fonte e stacking de tiros

O intervalo da fonte é o intervalo entre pontos de tiro, que é o número de espaçamentos de geofones usado para deslocar a fonte. Parâmetro que, em conjunto com o número de canais, vai dar a multiplicidade do arranjo. Pode-se calculá-lo tendo em mente uma multiplicidade (M) desejada pela seguinte fórmula:

$$I_f = N / (2 * M),$$

onde I_f é o intervalo da fonte e N o número de canais ativos no arranjo. Esse cálculo é em geral feito com base na multiplicidade máxima, com $I_f = 1$, sendo este o caso em que o espaçamento entre as fontes é igual ao espaçamento entre geofones.

Stacking de tiros é o número de tiros somados em cada registro, também sendo chamado de empilhamento vertical. Somam-se tiros na mesma posição para melhorar a razão sinal/ruído e melhorar a intensidade do sinal em *offsets* distantes. Funciona com base no mesmo princípio da multiplicidade em que as amplitudes coerentes se somam e o sinal aleatório se subtrai.

Esses são parâmetros importantes quando se tem em mente o tempo disponível para a realização do levantamento, pois quanto menor o intervalo da fonte e maior o número de *stacks* de campo, mais tempo irá levar o levantamento. Devem ser bem ponderados estes parâmetros, tentando chegar a um equilíbrio entre qualidade do sinal e tempo gasto no levantamento.

4.4-Locação de linhas

A locação de linhas envolve escolher sua localização, orientação e sentido em que vão ser levantadas, de forma a otimizar a qualidade do dado e facilitar o trabalho em campo e seu processamento. Como regra básica tem-se que, as linhas devem ser paralelas ou perpendiculares à direção de mergulho das camadas e quando forem paralelas, devem ser na medida do possível levantadas no sentido *up dip*. Quando as camadas são horizontais, isso vale da mesma forma para fraturamento. Quando os dois forem presentes, mergulho de camadas e falhas, a direção de mergulho das camadas é

um parâmetro mais importante, tendo prioridade. Os levantamentos dificilmente são feitos em lugares perfeitamente planos. Em presença de declividade é sempre recomendável levantar o dado do ponto mais alto para o mais baixo, a favor da declividade, tomando como base dados de um levantamento topográfico. Em casos onde houver declividade contrária ao mergulho, deve-se comparar sua inclinação e pesar qual é o mais importante no caso. Procura-se que o geofone mais distante aproxime-se do alvo.

Após a locação da linha, ela tem que ser preparada para aquisição. A preparação inclui a remoção de vegetação de forma a possibilitar a instalação dos equipamentos, o trânsito de pessoas ao longo da linha e o deslocamento da fonte. Deve-se prestar especial atenção ao substrato, se rochoso ou solo. Quando o substrato é rochoso será necessário perfurá-lo para instalar os geofones e dependendo do tipo de fonte usada, será necessário perfurar a rocha para acoplá-los de forma a não perder energia. Deve-se levar em consideração também o clima da região, pois locais com clima muito quente e seco podem ter solos tão duros quanto rocha, tornando o acoplamento de geofones impossível sem o uso de furadeira.

Quando o local para instalação da linha sísmica estiver preparado é hora de instalar os equipamentos. Prestar especial atenção para o acoplamento e alinhamento dos geofones, sempre enterrando completamente seus *spikes* e deixando-os firmemente presos ao chão. Quando adquirindo linhas em estradas, deve-se instalar o equipamento próximo das laterais dela, evitando a exposição do equipamento a perigos de atropelamentos. Estradas dificilmente são retas perfeitas. Portanto, é recomendável locar a linha de forma a cruzá-la o menor número de vezes possível. Outra situação que merece ser comentada é o caso de levantamento sobre bancadas de pedreiras, onde se deve instalar a linha o mais longe possível da face livre da bancada abaixo, minimizando assim o efeito de possíveis reflexões laterais.

4.5-O levantamento realizado

O levantamento realizado foi composto por 4 linhas sísmicas de alta resolução completas. Duas linhas foram perpendiculares à direção de mergulho, uma paralela e uma oblíqua. Foram utilizadas diferentes parametrizações para cada linha, pois os objetivos eram diferentes.

Aqui as atenções serão focadas na chamada linha da Bancada. Foi levantada no topo de uma bancada dentro da pedreira (Figura 6), sendo bastante afetada por ruídos produzidos por maquinário existente dentro da cava. Necessitou de uma leve terraplanagem feita com um trator pesado, o que facilitou o trabalho de instalação da linha (Figura 7). Devido aos ruídos ambientais altos, horários e dias alternativos foram usados para aquisição, sendo ela realizada das 18:00h às 21:45h, horário em que alguns moinhos da fábrica de concreto anexa à pedreira paravam para manutenção, em dias específicos quando a atividade de extração de argila era paralisada. Foram necessários 7 dias para adquirir a linha completa.



Figura 6 – fotografia da principal frente de lavra da pedreira do Atol, mostrando em vermelho a localização da linha da Bancada.



Figura 7 – fotografia mostrando a superfície da bancada na qual foi levantada a linha homônima, durante a aquisição dos dados.

A linha teve 254,25m de comprimento. Foi usado um I_e de 0.5m, visando resolver detalhes de ordem métrica como topo e base de camadas e acunhamentos. *Near offset* de 7,25m para atingir uma maior profundidade de investigação ao mesmo tempo cortando a parte mais rasa do registro que não fazia parte do alvo principal, por não estar dentro da seqüência sedimentar que se desejava imagear e por encontrar-se afetada pelo ruído das ondas superficiais. Foi usado o método *turn-on/turn-off* de aquisição sempre *end-on*. O *turn-on/turn-off* foi parcial, iniciando com 60 canais ativos e ligando quatro canais de cada vez e ao final da linha reduzindo de 120 ativos até 60, dois canais de cada vez. Este método de início e término de levantamento ajuda a aumentar a multiplicidade o mais rápido de forma que se tenha a cobertura máxima na maior parte do arranjo. A Figura 8 ilustra os sismogramas obtidos.

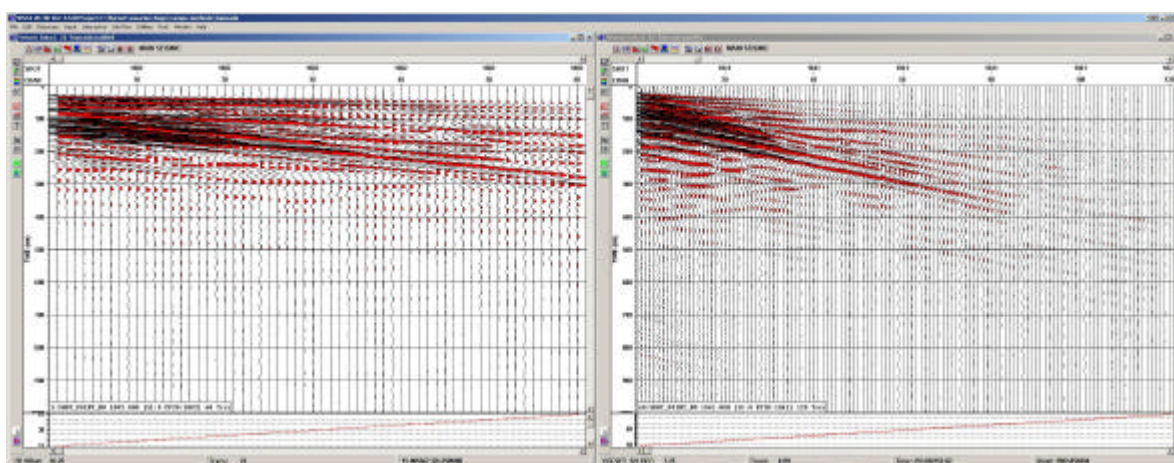


Figura 8 – na esquerda, tiro com 60 canais ativos e na direita com 120.

Foi usado 1s de tempo de registro e razão de amostragem de 0.5ms, resultando uma frequência de Nyquist de 1000Hz. Esses dois parâmetros temporais foram superdimensionados, ficando bem evidente o fato do tempo de registro excessivo na Figura 8 acima.

O intervalo entre pontos de tiro foi de 0.5m (igual ao I_e) e foram somados cinco tiros em cada ponto (*stacks* de campo) para melhorar a razão sinal/ruído.

O objetivo do I_e usado é conseguir resolver detalhes métricos como topo e base de refletores com dimensões métricas e acunhamentos dentro da seção imageada. Como temos que se necessita de ao menos dois pontos de amostragem dentro de um

comprimento de onda para se definir um refletor, espera-se que com 0.5m de λ esse objetivo seja alcançado, pois teremos duas amostras dentro de comprimento de onda de 1m.

Visualmente são identificadas na face livre da pedreira diversas lentes de folhelho intercaladas a coquinas com um corpo mais espesso (aproximadamente 7 m) de arenito no topo da seqüência. Temos então, um corpo de arenito de aproximadamente 7 m (porção coberta de vegetação logo abaixo da superfície da bancada), uma camada contínua de folhelho cinza-esverdeado com aproximadamente 5m e o restante da face exposta são coquinas com camadas de folhelho cinza-claro intercaladas com espessura variando de 0.5m a 2m. Estas camadas têm geometria lenticular terminando freqüentemente em acunhamentos, apenas para recomençar logo em seguida. A altura máxima da face livre abaixo da superfície da bancada era de aproximadamente 60m, ou seja, essa intercalação de coquinas com folhelhos se dava ao menos por aproximadamente 53m.

Com o comprimento de 60m do arranjo mais o *near offset* de 7.25m espera-se que seja possível imagear a face livre inteira e mais um pouco abaixo da superfície.

5-Processamento

A etapa de processamento consistiu de duas fases. Uma primeira onde o dado foi trabalhado dentro do programa *Vista Seismic Processing 2D/3D* versão 5.500, produzido pela GEDCO. Na primeira etapa foi gerado um fluxo de processamento, chamado aqui de processamento A (Figura 9).

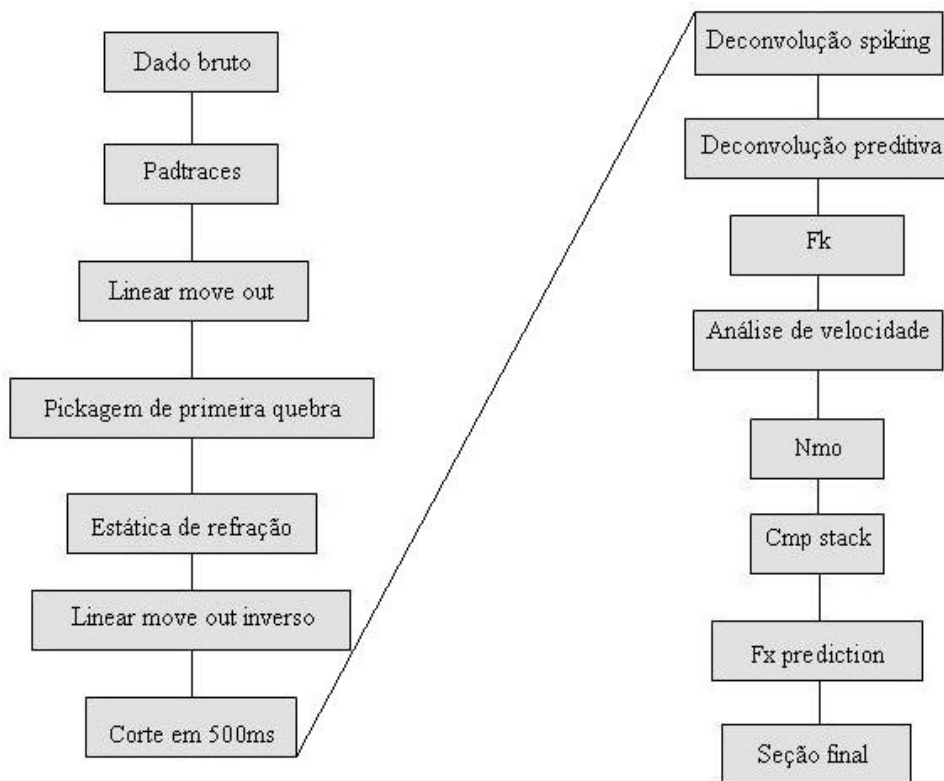


Figura 9 – fluxo de processamento A.

A segunda fase fez uso do programa de computador PROMAX, produzido pela Landmark. Nessa segunda etapa foram gerados mais dois fluxos de processamento: B e C (Figura 10).

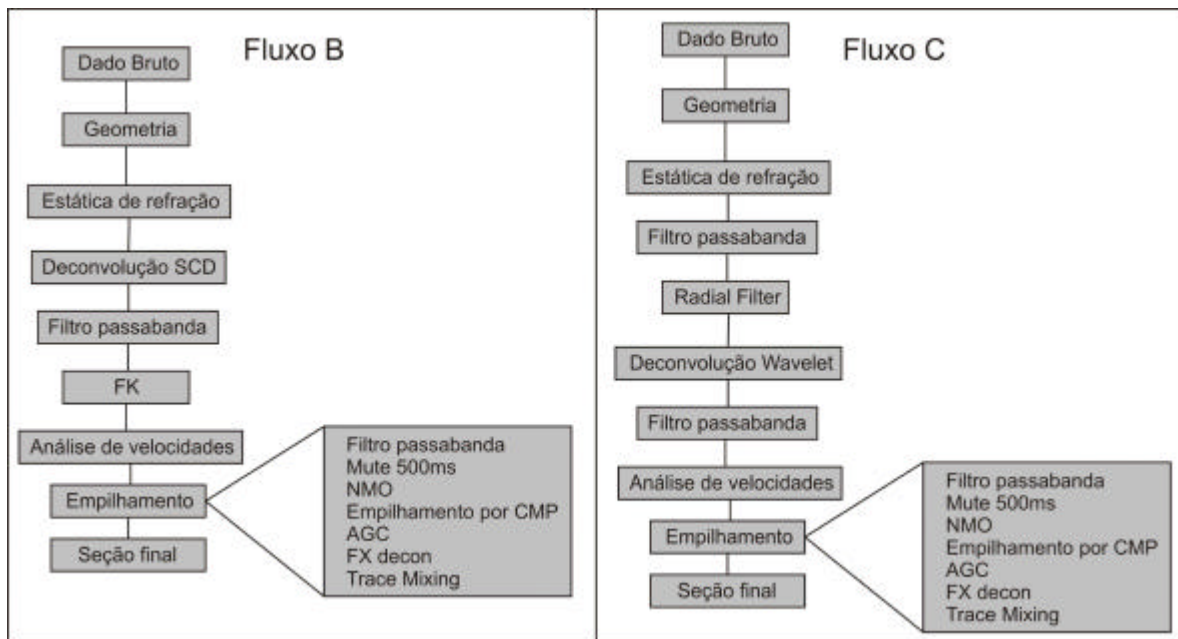


Figura 10 – fluxos de processamento B e C.

5.1-Processamento A

Foi adotado um fluxo de processamento simples. Inicialmente foi usado um processo chamado de *trace padding* (*padtraces*) que serve para igualar o número de traços em todos os tiros facilitando o entendimento do *header* do dado pelo programa de processamento.

Com isso pode-se iniciar o passo de correção do cabeçalho ou *header*, que é uma porção do arquivo que guarda informações sobre o dado e onde serão inseridas as informações sobre a geometria de aquisição. Para isso o programa disponibiliza duas tabelas, uma de receptores e uma de tiros, assim como uma tela para inserção de dados para composição das celas ou *bins*, que são unidades quadradas, para as quais pode-se extrapolar os valores de parâmetros de geometria, e uma para inserção de dados gerais que são número de traços por tiro, intervalo entre estações, intervalo entre tiros, número de canais auxiliares e posição dos mesmos e ainda há uma opção de selecionar um número para canais inexistentes. Todas as correções feitas no *header* podem ser salvas novamente para ele e também podem ser salvas para arquivos a parte. Na tela de inserção de geometria também existem ferramentas para se checar a multiplicidade,

checar o posicionamento da linha e seus *bins* em superfície, visualmente conferir a posição dos pontos de tiros em relação aos receptores e também conferir a posição topográfica dos receptores e dos pontos de tiro. Ao final da correção salvam-se as alterações para o *header* do arquivo, de forma que quando aberto ele já reconheça os valores dos parâmetros de geometria presentes.

Com o *header* devidamente preenchido e a geometria da linha correta iniciam-se as correções de estática de refração e de topografia. São passos importantíssimos para obter uma seção final com qualidade. Antes de realizar tais correções foi aplicado ao dado um processo chamado de *Linear Move Out* – LMO. Este processo funciona aplicando uma correção temporal em cada traço de acordo com uma função de velocidade LMO da seguinte forma:

$$\text{Correção temporal aplicada} = \text{offset do traço} / \text{função de velocidade LMO}.$$

A função de velocidade LMO é definida estipulando velocidades para conjuntos de traços delimitados pelo *offset* do primeiro e do último traço do conjunto.

O LMO foi aplicado ao dado para permitir o uso de uma ferramenta interativa de marcação de primeira quebra de refração. Essa ferramenta marca automaticamente todos os tiros ou individualmente, de acordo com o desejo do processador. Ao alinhar a parte superior do dado com o LMO diminui-se o tamanho necessário da janela de busca a ser aplicada no dado, melhorando a consistência das marcações automáticas. É necessária uma conferência posterior (Figura 11), porém o tempo economizado com o uso dessa ferramenta é muito maior do que o tempo perdido com a marcação manual.

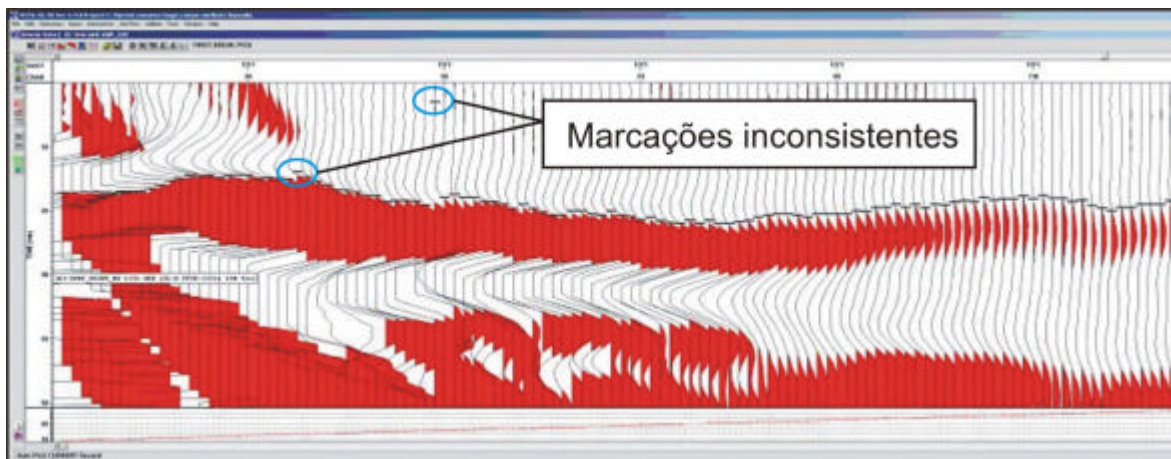


Figura 11 – Observar a boa consistência da marcação automática dos tempos de primeira chegada da refração com poucas marcações inconsistentes.

O programa permite que seja feito um controle estatístico nas marcações (Figura 12), de forma que erros são facilmente detectados e corrigidos.

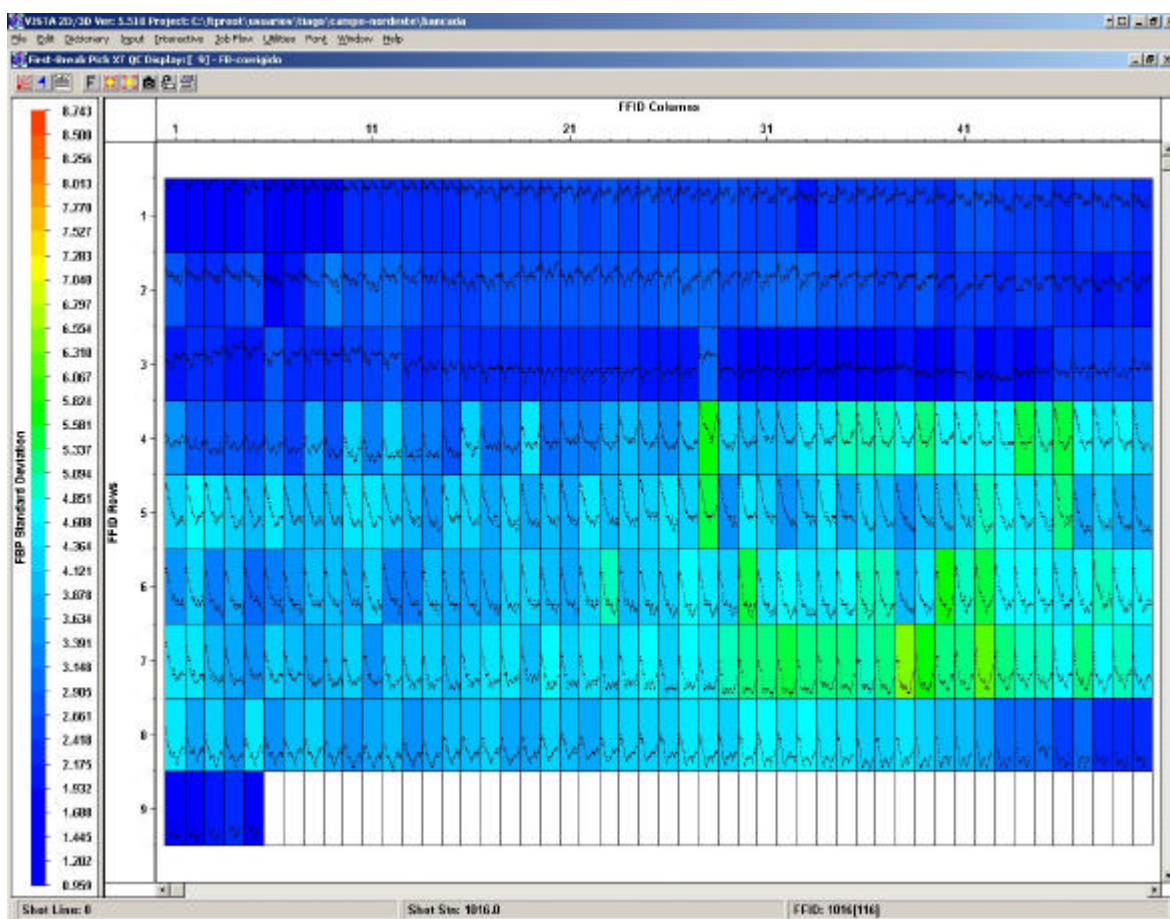


Figura 12 – controle estatístico das marcações de primeira quebra de refração. Cada quadrado é um tiro sendo a escala de cores o desvio padrão.

Após chegar-se a uma qualidade estatística satisfatória em que o desvio padrão entre as marcações de primeira quebra de cada arquivo é suficientemente pequeno (foi usado 5.5, valor obtido a partir de observações no dado), salvam-se os valores de estática a serem aplicados em uma palavra do *header* (parte do arquivo que armazena informações sobre seu conteúdo) e procede-se para a aplicação da correção estática de refração e de elevação. Terminando essa etapa de processamento, remove-se o LMO aplicado retornando o dado para posição original. A próxima etapa do processamento é a aplicação de filtros.

Antes de iniciar a filtragem é sempre bom observar o dado para conhecê-lo bem, identificando a melhor forma de filtragem e avaliando possíveis problemas. Ao inspecionar os dados do presente estudo constatou-se que 1000ms de tempo de registro era demasiado grande. Foi feito então o corte de 1000ms para 500ms (Figura 13), diminuindo o tamanho ocupado pelo arquivo e diminuindo também o tempo de

processamento além de melhorar a visualização. Esse corte foi feito com base no tempo da ultima chegada significativa da onda direta, que é aproximadamente 600ms. Para facilitação em cálculos usamos o valor de 500ms.

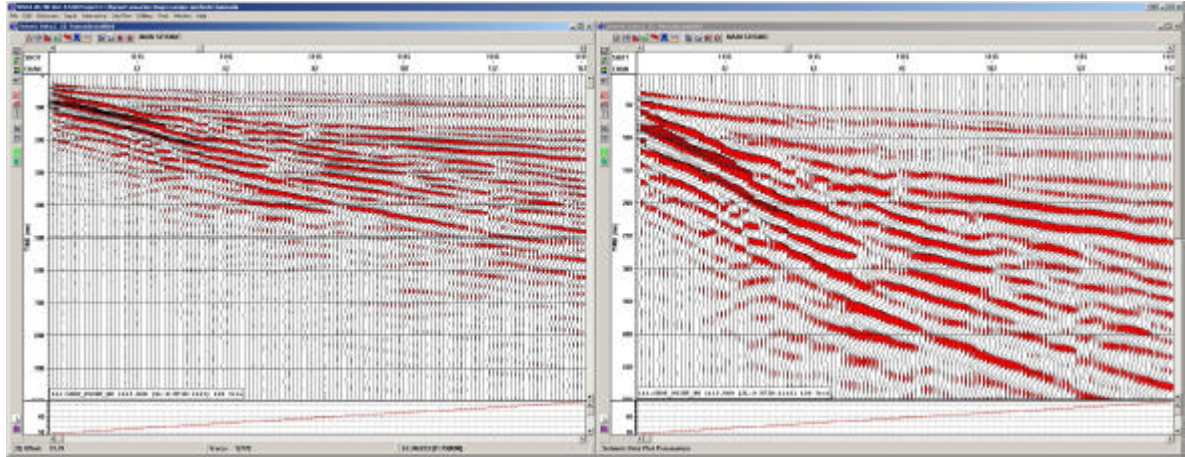


Figura 13 – dado na esquerda com 1000ms e na direita com 500ms. Economia de espaço e tempo sem perda de dado útil para o objetivo do estudo.

5.1.1- O sismograma e a convolução

Um sismograma é tido como a resposta de um sistema unidimensional linear cuja entrada é uma onda sísmica. Essa visão de um sistema unidimensional linear tem sido aplicada com grande sucesso e tem sido especialmente importante no estudo da deconvolução (Ziolkowski, 1984). Nessa mesma linha pode-se dizer que o sismograma é o resultado da convolução do sinal da fonte (*wavelet*) com a resposta impulsiva da Terra (Figura 14). A *wavelet* produzida pela fonte usada é de enorme importância, pois a fase dela faz parte de uma importante premissa para aplicação da deconvolução com sucesso, como se discute adiante.

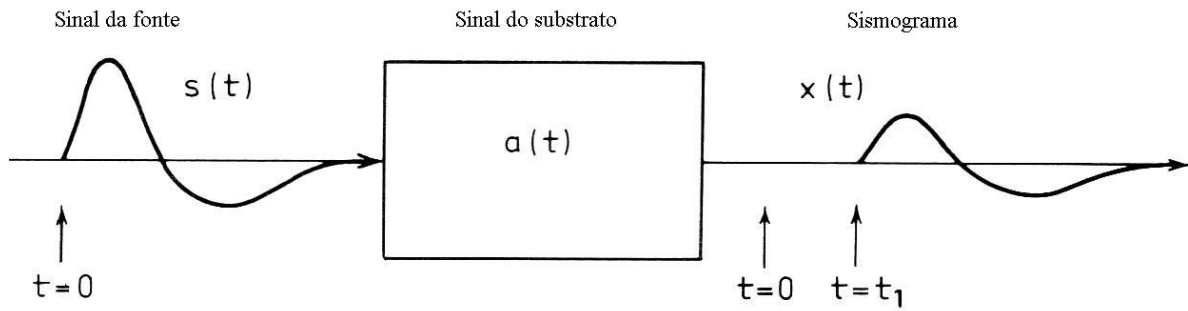


Figura 14 – representação linear de um sistema com fonte e receptores pontuais em um meio elástico, isotrópico, homogêneo e infinito (adaptado de Ziolkowski, 1983).

5.1.1.1-Considerações sobre wavelets e fase

Uma *wavelet* (às vezes traduzida como ondícula – um pulso de pequena duração) é considerada uma forma de onda transiente com energia finita, tendo um tempo de início e um tempo de termino, com toda a sua energia confinada nesse intervalo de tempo. Quando a *wavelet* é simétrica em relação ao tempo zero e tem uma amplitude máxima positiva no tempo zero ela é dita de fase zero. Uma mudança de fase constante muda a forma de uma *wavelet*. Mostrando-se na Figura 15 um caso particular em que uma mudança de 90° faz com que uma *wavelet* simétrica torne-se assimétrica enquanto uma mudança de 180° inverte a sua polaridade (Yilmaz, 2001).

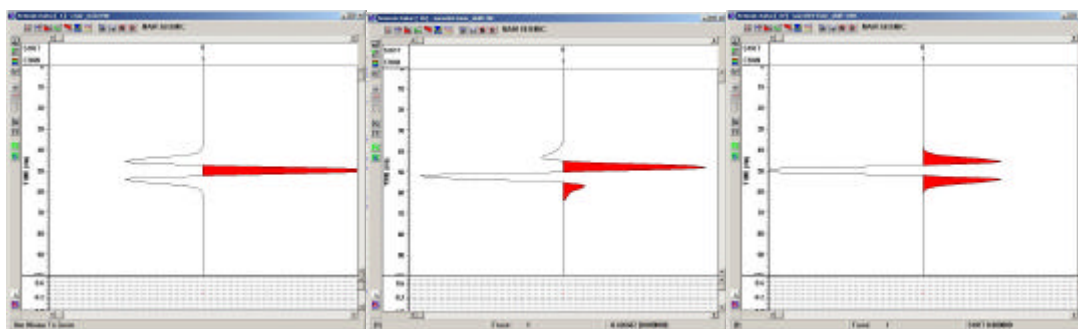


Figura 15 – da esquerda para a direita: wavelet original, rotação de 90° aplicada tornando-a assimétrica e rotação de 180° invertendo sua polaridade.

Uma *wavelet* com a maior parte de sua energia concentrada na sua parte frontal (*onset*) é dita de fase mínima. Similarmente, uma *wavelet* com a maior parte de sua

energia concentrada na sua porção final é dita de fase máxima. E uma *wavelet* entre essas duas é de fase mista (Figura 16).

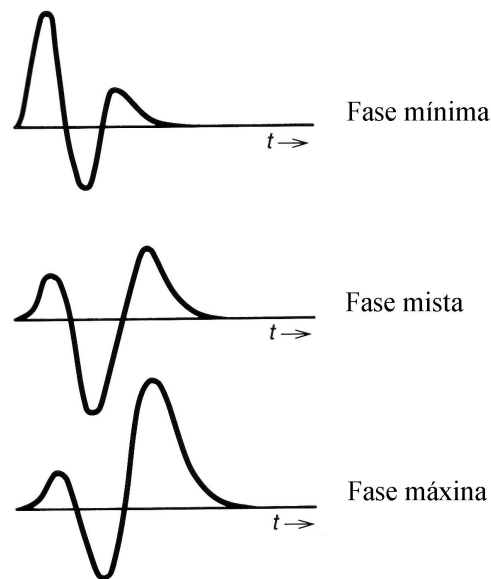


Figura 16 – *Wavelets* com mesmo espectro de amplitude e diferentes fases, de acordo com a posição da maior quantidade de energia (adaptado de Yilmaz, 2001).

Uma *wavelet* de fase mínima é unilateral sendo zero antes de $t = 0$. Uma *wavelet* que é zero para $t < 0$ é dita causal. Essas definições são condizentes com sistemas físicos que respondem a um impulso somente depois desse impulso ser realizado.

A importância da fase mínima pode ser observada em um exercício com filtro inverso, realizado em Yilmaz (2001) onde é mostrado que uma *wavelet* com a maior parte de sua energia concentrada na sua porção inicial (*wavelet* de fase mínima) reduz o erro ao mínimo e tem uma distribuição de energia que se assemelha mais ao dado de entrada. Isso atesta a importância da *wavelet* da fonte usada ser de fase mínima.

5.1.2-Deconvolução

Antes de se aplicar a deconvolução é importante checar se o dado a ser filtrado segue as sete premissas básicas para a aplicação desse processo. Caso o dado não siga as premissas, deve ter-se em mente que a deconvolução não irá funcionar de forma ótima. Essas premissas seriam:

Primeira: que o subsolo é feito de camadas horizontais com velocidade constante;

Segunda: a fonte gera uma onda P que incide nas camadas com direção normal, circunstância em que não são geradas ondas S;

Terceira: a forma da onda emitida pela fonte é estacionária, ou seja, não muda ao viajar pela subsuperfície;

Quarta: o ruído “ $n(t)$ ” é zero;

Quinta: a forma da onda da fonte é conhecida;

Sexta: refletividade é um processo aleatório, o que implica que o sismograma tem as características da *wavelet*, no sentido de que o espectro de amplitude e as autocorrelações de ambos são semelhantes (tendo a sexta premissa satisfeita, a 5ª não precisa ocorrer, pois a *wavelet* pode ser estimada quando a refletividade é aleatória);

Sétima: a *wavelet* é de fase mínima.

Mesmo com a grande dificuldade em adquirir um dado que siga todas essas premissas é importante lembrar que o não cumprimento de algumas delas não impossibilita a aplicação da deconvolução e sim, apenas diminui a sua eficácia.

Muitas destas premissas não se verificam completamente, mas aproximam-se suficientemente para permitirem o uso da deconvolução. Um exemplo de premissa que não se verifica completamente seria a primeira, pois o subsolo não é feito de camadas perfeitamente horizontais, mas geralmente a aproximação é satisfatória. Um exemplo de premissa seguida à risca é a sétima, pois a fonte usada (queda de peso acelerada) é uma fonte impulsiva, gerando uma *wavelet* de fase mínima (Mike Galbraith, 2006, em comunicação pessoal).

A deconvolução é aplicada para retirar a influência da *wavelet* da fonte do seu dado, terminando com um registro o mais próximo possível da função refletividade. Usou-se inicialmente uma deconvolução *spiking* e depois uma preditiva. Considerando o sismograma x_t como sendo a convolução da *wavelet* da fonte s_t com a resposta impulsiva do substrato g_t , temos que a deconvolução *spiking* funciona de forma a recuperar g_t desde que g seja branco (equivalente a uma função delta, tornando-se o mais próximo da função refletividade quanto possível), randômico e estacionário e que s_t seja de fase mínima. A Figura 17 mostra a janela usada para inserção de parâmetros para realizar a deconvolução *spiking* em ambiente VISTA.

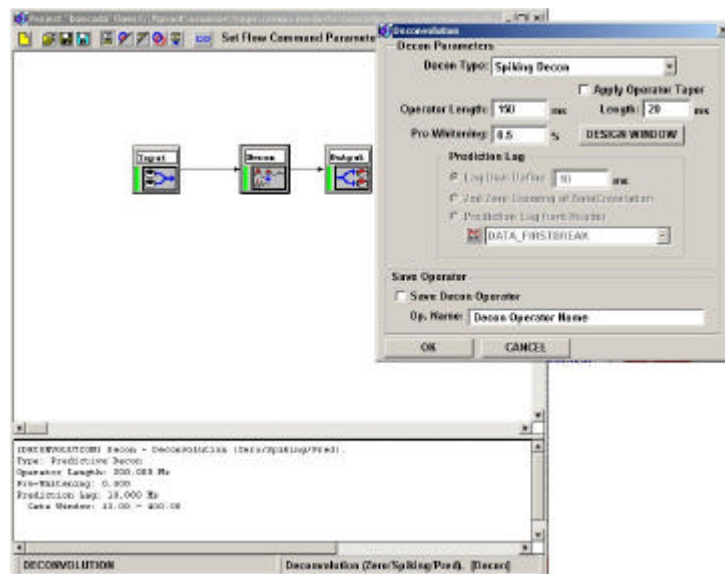
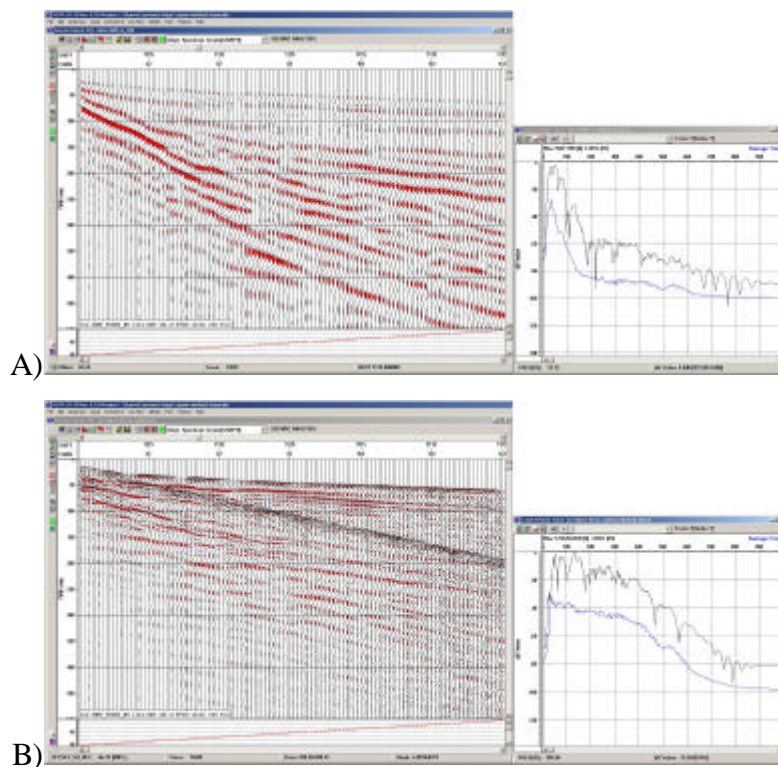


Figura 17 – fluxo usado para a deconvolução *spiking*, mostrado junto com a janela de inserção de parâmetros.

Neste ponto usamos uma técnica de tentativa e erro que é controlada através do espectro de amplitude do dado, até chegarmos nos parâmetros melhores para esse processo (Figura 18).



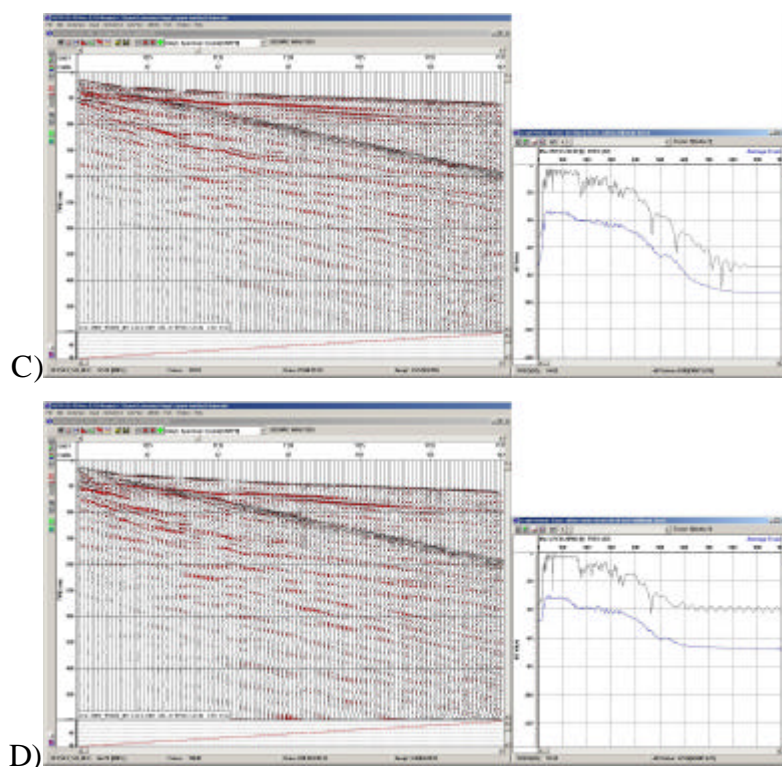


Figura 18 – figura mostrando na esquerda sismogramas e na direita seus respectivos espectros de frequência. O traço preto indica o valor máximo de frequência e o azul o valor médio. Observar a eficiência na aplicação da deconvolução spiking, variando o comprimento do operador: A) dado bruto; B) 10ms; C) 50ms ; e D) 150ms. Observa-se a melhora na recuperação de altas frequências com o aumento do comprimento de operador.

Foram usados os seguintes valores de parâmetros: comprimento do operador 150ms; *pré-whitening* 0.5%; sem *taper*; e usando uma janela de 14 a 400ms. Os resultados obtidos mostraram uma recuperação das altas frequências.

Com bons resultados na fase de deconvolução *spiking*, foi feita a deconvolução preditiva. Esse processo atua na remoção de um tipo de múltipla chamada de reverberação, fenômeno que gera reflexões sucessivas que interferem na visualização do dado na sua porção mais superficial. Esse fenômeno ocorre devido à grande diferença de velocidade do estrato mais superficial (camada de alteração) com o subjacente (rocha sã) e também com o ar (Figura 19). Os refletores ar/camada de alteração e camada de alteração/rocha “aprisionam” a onda, forçando-a a reverberar dentro deste espaço confinado, refletindo sucessivamente.

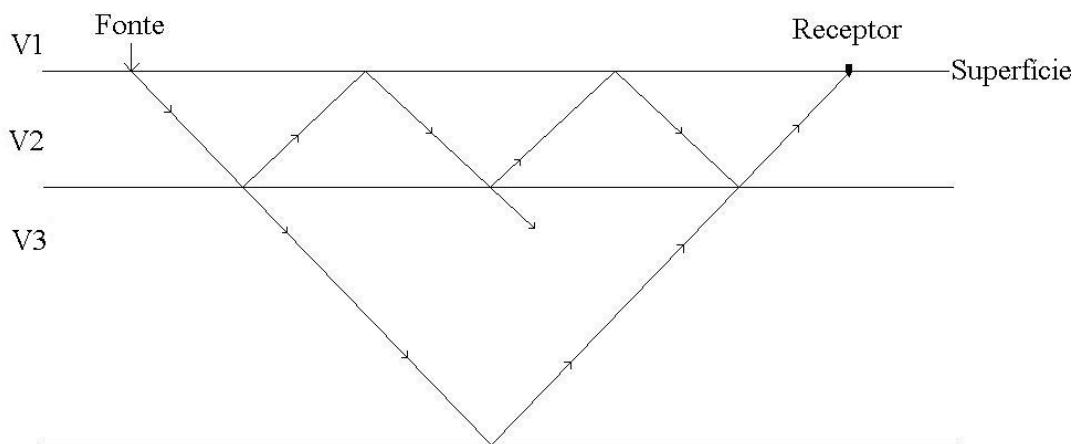


Figura 19 – desenho esquemático de como ocorre o fenômeno da reverberação.
 $V1 < V2 < V3$.

Outros tipos de múltipla, como efeito *ghost*, não são atuantes neste tipo de levantamentos, uma vez que a fonte se localiza sobre a superfície.

A deconvolução preditiva aplica os mesmos parâmetros definidos pela *spiking* mas adiciona a eles o valor de *lag* (Figura 20).

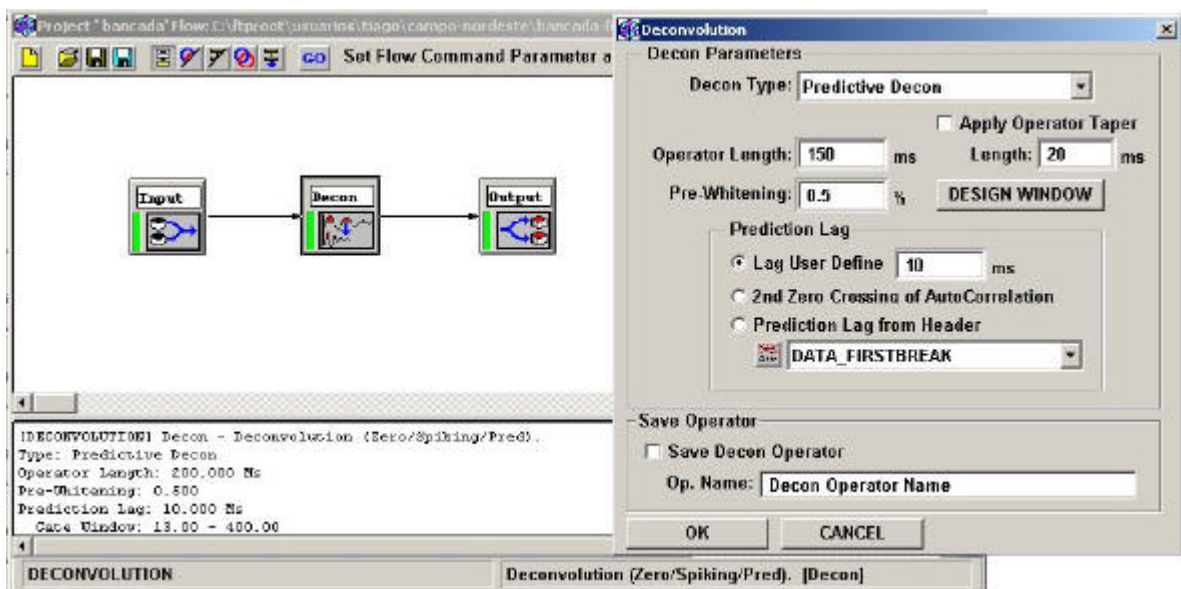


Figura 20 – fluxo usado para a deconvolução preditiva, mostrado junto com a janela de inserção de parâmetros.

Esse processo teve resultado bastante satisfatório na remoção da reverberação, evidenciando feições pouco visíveis no dado bruto (Figura 21).

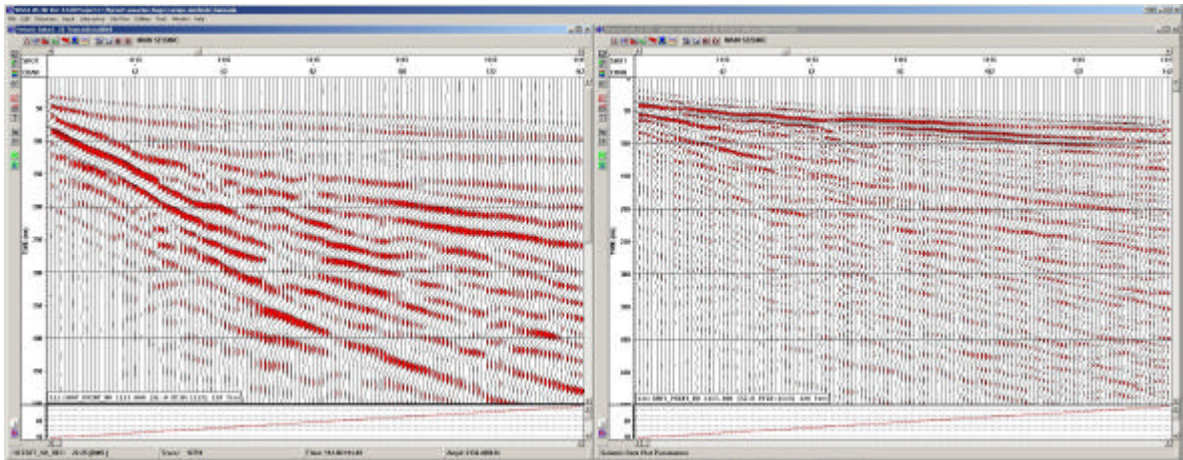


Figura 21 – na esquerda o dado bruto e na direita o dado após o processo de deconvolução.

5.1.3-Filtragem – FK

O passo seguinte na filtragem dos dados é a filtragem FK. Esse processo atua no dado quando ele está em um domínio diferente do tradicional TX. O dado é exibido em um gráfico de frequência (F) no eixo Y por número de onda (K) no eixo X, daí o nome FK. Esse gráfico chamado de espectro FK é obtido através da transformada de Fourier 2D. Isso é particularmente útil quando se necessita filtrar certas velocidades específicas e é justamente isso que se deseja (Figura 22). São observadas tendências de inclinações diferentes com disposição radial, sendo que tendências mais verticais representam eventos de velocidades mais altas e tendências mais horizontais representam eventos de velocidades mais baixas. Filtram-se áreas do dado onde se encontram ruídos indesejados.

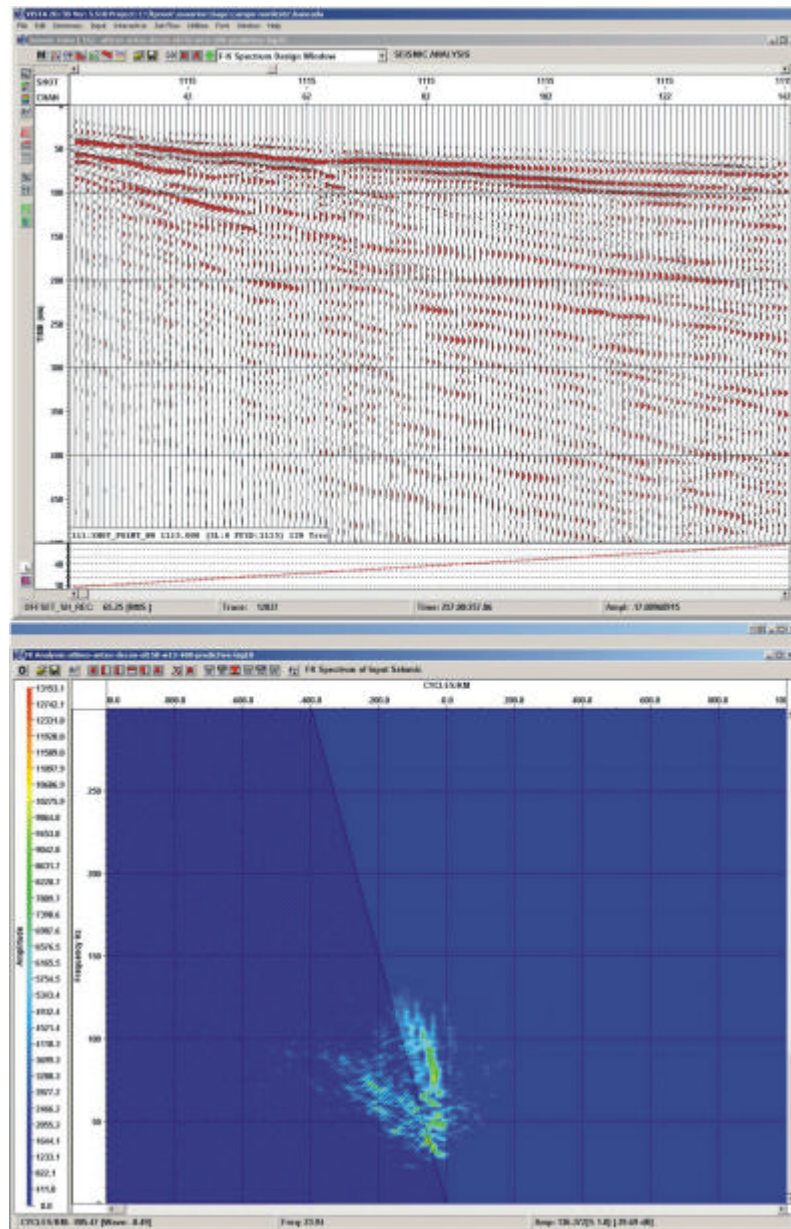


Figura 22 – dado pós deconvolução, com o seu espectro FK abaixo já com um filtro desenhado. O filtro é a porção sombreada mais escura da figura, sendo que os valores dentro da área sombreada serão rejeitados.

Após a filtragem, a informação contida dentro da área especificada para aplicação do filtro é excluída. Dentro do processo de filtragem FK existe a opção de aplicação de um ganho *AGC* – *Automatic Gain Control* no tempo total de registro (Figura 23).

O *AGC* primeiramente calcula o valor médio de *RMS* da amplitude dos traços dentro de uma janela de tempo. A seguir a razão do nível *RMS* desejado para esse valor

médio é designado como o valor de uma função de ganho. O próximo passo é mover o a janela de tempo uma amostra abaixo no traço e calcular o valor da função de ganho para o novo valor médio aqui calculado (Yilmaz, 2001).

É aplicado de duas formas, sendo que é aplicado na tela quando do dimensionamento do filtro para melhorar a visualização do dado, e também antes da aplicação da aplicação deste processo, diminuindo a possibilidade de geração de ruídos pelo filtro.

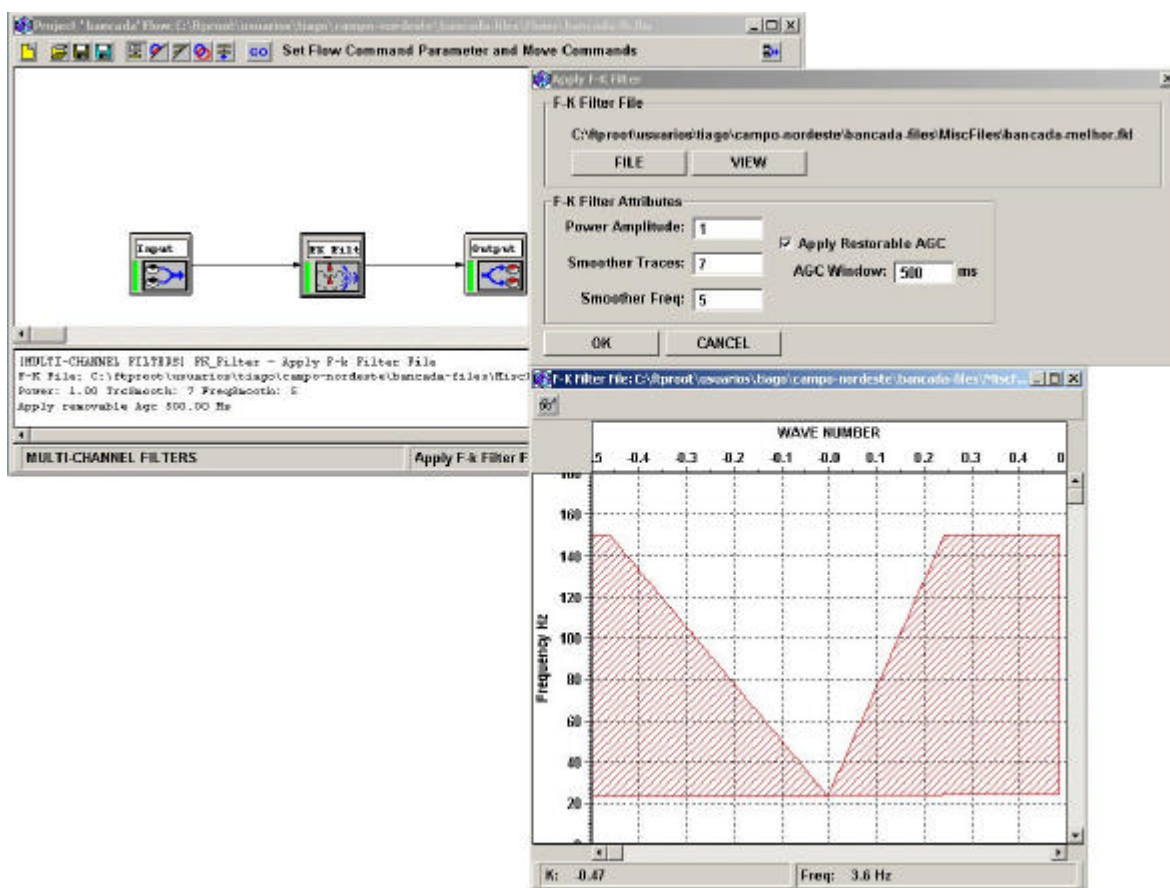


Figura 23 – fluxo de filtragem FK, com a janela de inserção de parâmetros e janela de visualização do filtro aplicado.

Após a filtragem FK, o dado fica com menos ruídos de velocidades baixas, sendo assim mais fácil a análise de velocidades (Figura 24).

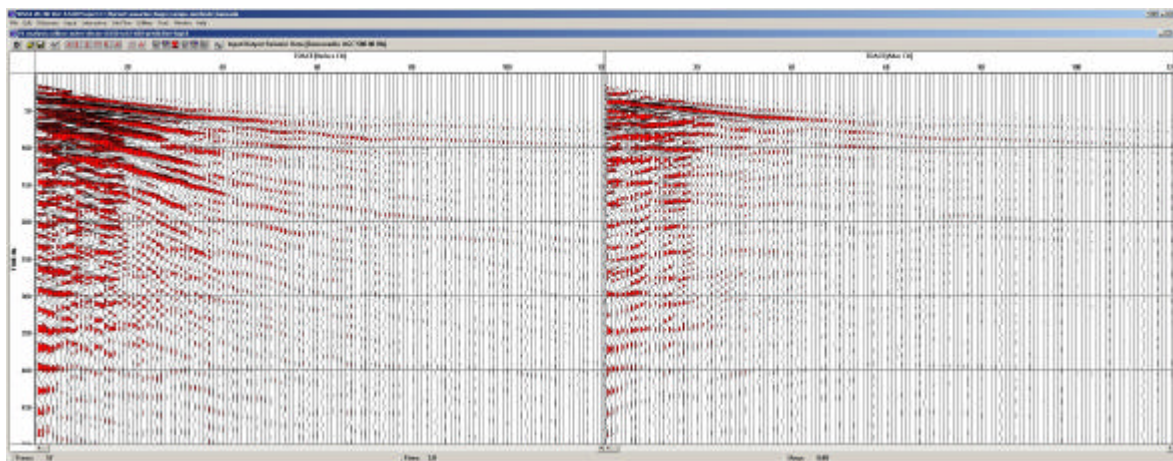


Figura 24 – dado antes (esquerda) e depois (direita) da filtragem FK. Nota-se a grande redução de ruídos de baixa velocidade.

5.1.4-Análise de Velocidades

Com o dado filtrado, partiu-se para a análise de velocidades. Esse é um passo extremamente importante no fluxo de processamento, pois é aqui que se gera a função de velocidades usada no empilhamento (*stacking*) final. O programa de computador VISTA possui algumas ferramentas de análise de velocidades. Duas delas foram usadas e seus resultados comparados para verificar a precisão e consistência da função de velocidades definida.

O primeiro usado foi um método de análise interativa, usando análise de painéis CVS – *Constant Velocity Stacks*, uma janela de *semblance* e uma janela de *common offset gathers* (agrupamentos de *offsets* comuns) (Figura 25). Os painéis CVS são figuras geradas com CMP's empilhados, sendo que são escolhidos os centrais e o numero de CMP's à frente e atrás destes. Eles são repetidos lateralmente com velocidades de correção NMO – *Normal Move Out* crescentes e espaçadas de forma regular. A janela de *semblance* é um gráfico que mostra valores da razão normalizada da energia que entra pela energia que sai (Yilmaz, 2001), plotados em um gráfico de tempo por velocidade. A janela de *common offset gathers* é um “pseudo” empilhamento feito com traços de mesmo *offset* onde ajustamos uma hipérbole que tenha velocidade coincidente com o evento que se deseja alinhar, ou também pode-se aplicar a correção NMO simultaneamente, ajustando desta forma uma reta sobre o evento e observando se este torna-se linear.

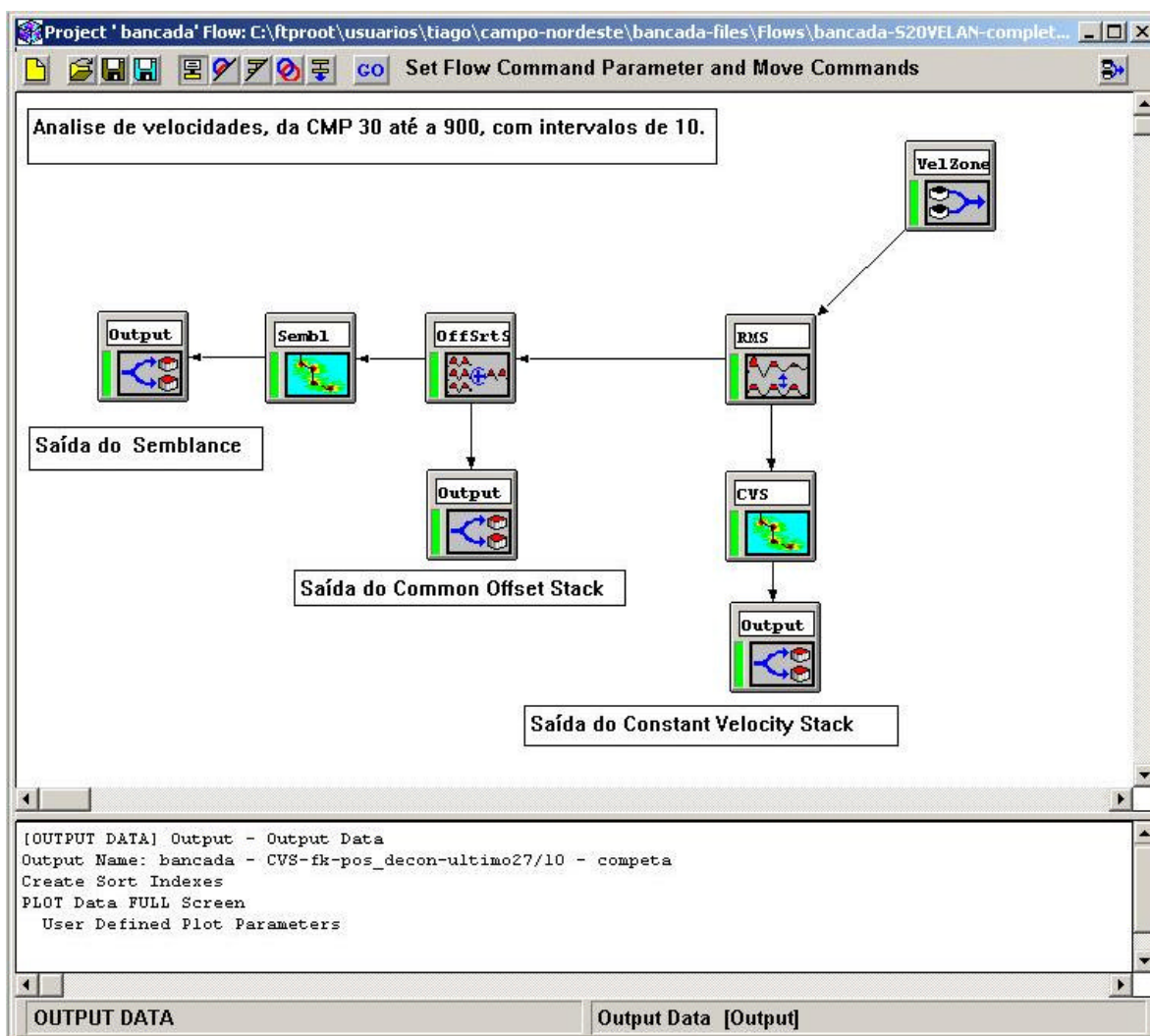


Figura 25 – fluxo usado para gerar os painéis CVS, as janelas de *Common Offset Gathers* e de *semblance*.

Mostrando estas três janelas ao mesmo tempo e com o cursor movendo-se simultaneamente nelas, pode-se definir com mais facilidade os locais ideais para definir os pares velocidade-tempo para a função (Figura 26).

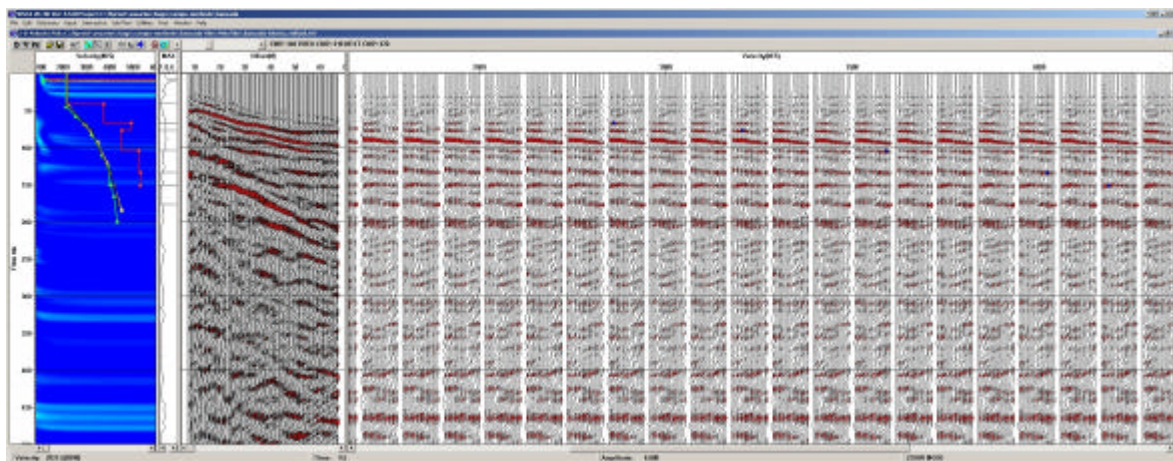


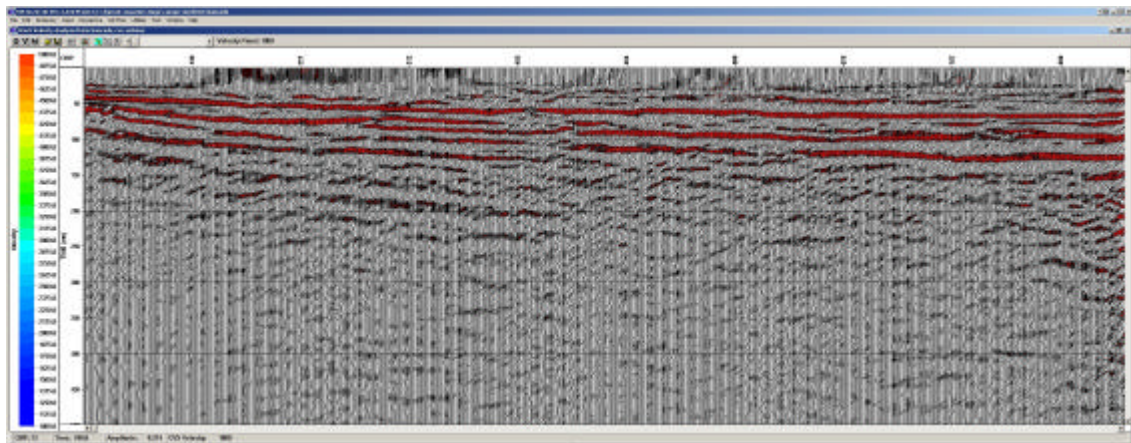
Figura 26 – ferramenta de análise de velocidades interativa. Observam-se as janelas de *semblance* (esquerda), *common offset gathers* (centro) e painéis *CVS* (direita).

O outro método de definição de função de velocidades usado foi o de análise de velocidades contínuas (*continuous velocity analysis*) (Figura 27) onde são gerados painéis empilhados com velocidades constantes e neles observa-se o comportamento do dado, definindo pares velocidade-tempo onde o empilhamento dos dados é ideal. Faz-se isso aplicando a correção NMO com uma velocidade constante em todo seu registro e fazendo vários empilhamentos com as diferentes velocidades. Esse método faz uso de painéis *CVS* (Figura 28). A Figura 27 mostra o dado empilhado com duas velocidades distintas, acima 1000m/s e embaixo 2000m/s.

No empilhamento superior com velocidade mais baixa, ficam evidenciados eventos lineares de mais baixa velocidade sendo estes muito provavelmente ruídos. Também na parte superior do dado observam-se eventos corrigidos de forma errada, que com velocidades mais altas poderiam vir a empilhar.

Já no empilhamento inferior com velocidade mais alta, apesar de se observarem eventos lineares, eles são diferentes dos anteriores. Esses novos eventos empilhados são cortados pelos ruídos de mais baixa velocidade, que agora não mais se alinham.

A)



B)

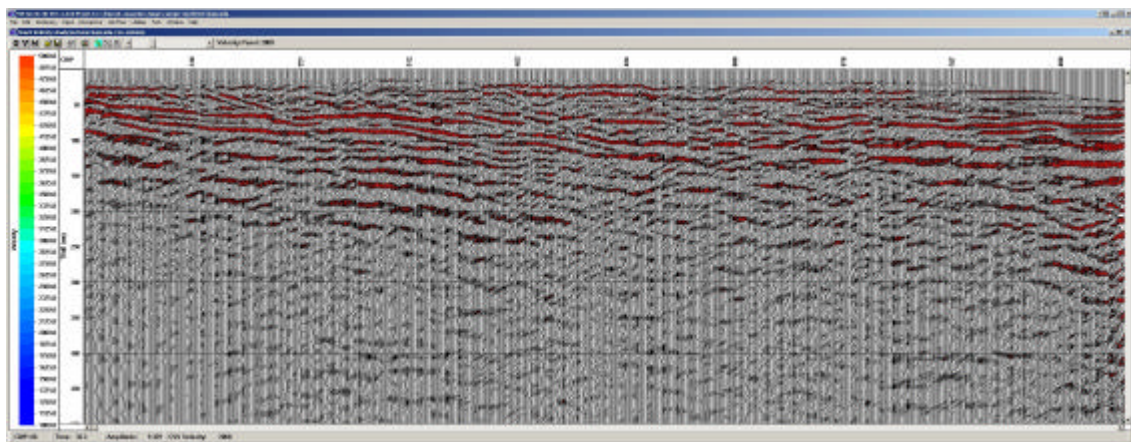


Figura 27 – painéis com dado empilhado com velocidade constante. O painel A foi empilhado com 1000m/s e o painel B com 2000m/s.

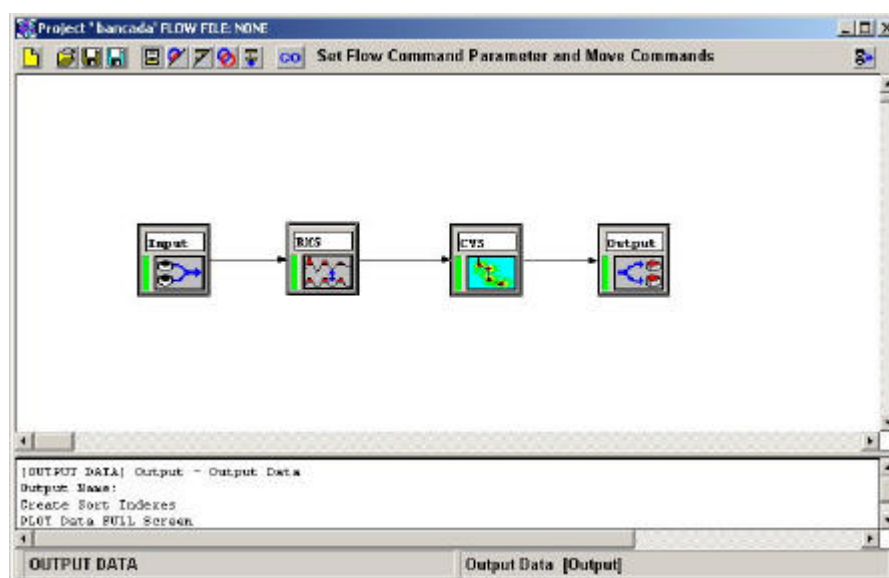


Figura 28 – fluxo usado para geração dos painéis CVS.

A partir de análises de velocidades realizadas usando essas duas ferramentas, definiu-se uma função de velocidades que foi então usada para empilhar os dados.

5.1.5-Empilhamento

Para empilhar o dado é aplicada uma correção *NMO* – *Normal Move Out*, onde são alinhados os eventos de mesmas velocidades a partir da função de velocidades previamente definida. A Figura 9 mostrou como passos separados a correção *NMO* e o empilhamento do dado, mas para efeito de processamento esses passos são aplicados no mesmo fluxo (Figura 29). O dado foi ordenado para empilhamento usando valores de *CMP* – *Common Mid Point*.

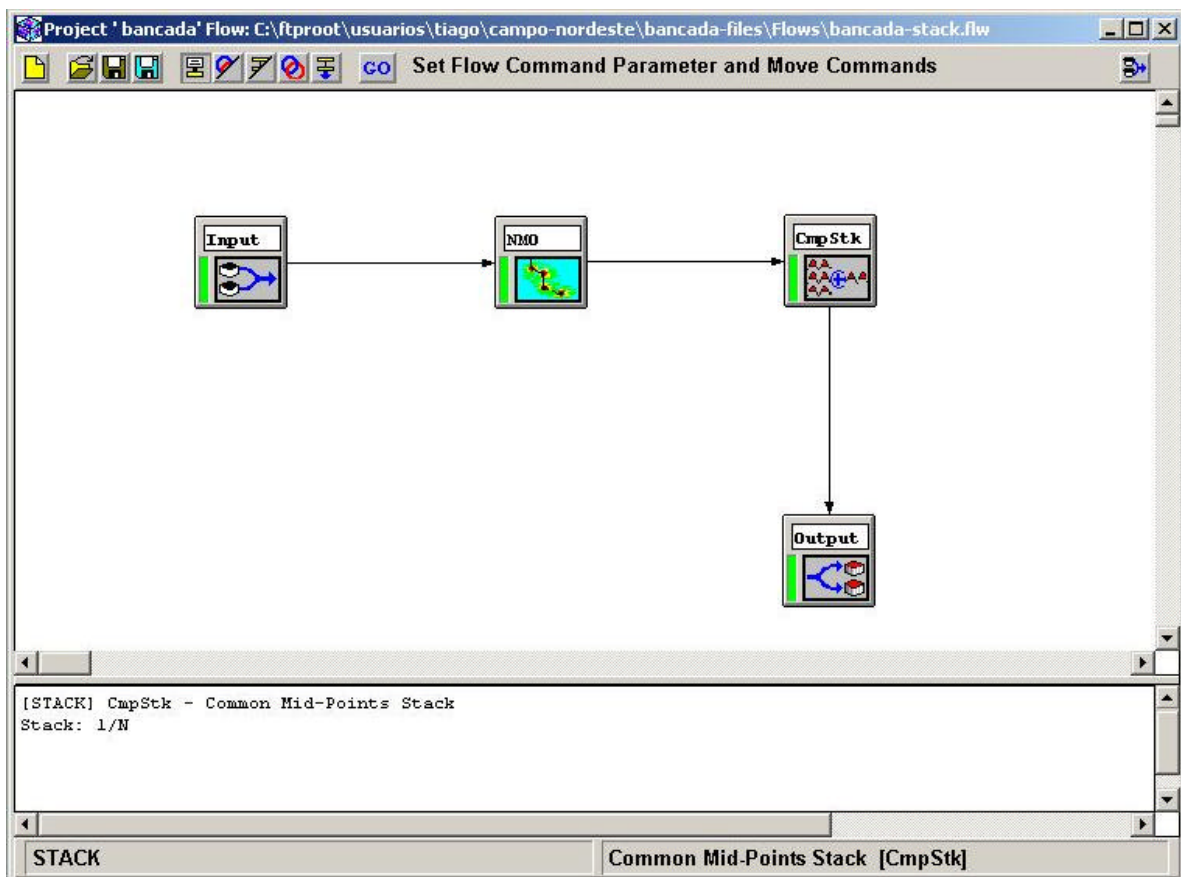


Figura 29 – fluxo usado para empilhar o dado. Observam-se os ícones de processo de *NMO* e de empilhamento por *CMP* (CmpStk) separados.

Após o empilhamento temos uma seção sísmica completa, mas ainda não em sua versão final (Figura 30). Processos pós-empilhamento são recomendáveis para melhorar o resultado final.

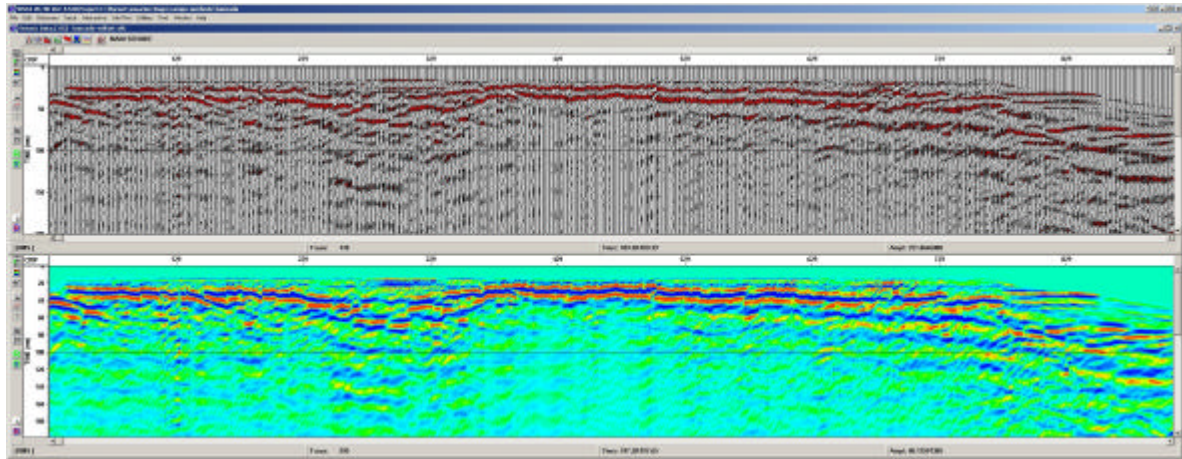


Figura 30 – seção sísmica empilhada. Na parte superior a visualização de traços (*wiggle/variable área*) e na inferior a visualização de escala de cores (*variable density*).

5.1.6-FX Prediction

Na seção empilhada foi aplicado um processo chamado de *FX prediction*. Esse processo atua homogeneizando a aparência do dado.

Ele funciona aplicando primeiramente a Transformada de Fourier a cada traço. As amostras complexas de frequência são multiplexadas para ser obtida uma série de valores mono-frequência através do espaço (transformada F-X). A seguir o programa calcula um filtro de predição bilateral de Wiener para cada série de mono-frequências. Esse filtro é aplicado e a transformada F-X inversa é calculada. O efeito final desse processo é o de um dado mais “liso” e homogêneo.

Os parâmetros para esse processo são: a) comprimento do filtro em número de traços; b) tamanho da janela de aplicação do filtro em número de traços; c) frequência de corte; d) expoente.

Os valores usados para os parâmetros acima foram: a) 2 traços; b) 20 traços; c) 200 Hz; d) 1.5. Uma janela de aplicação de 0ms até 250ms foi aplicada, para otimização do tempo de processamento.

O resultado da aplicação desse processo foi satisfatório, provendo os resultados previstos, homogeneizando o dado e evidenciando certas feições (Figura 31). Ao se comparar o dado antes e depois da aplicação do *FX prediction* fica clara a melhora trazida pelo processo (Figura 32).

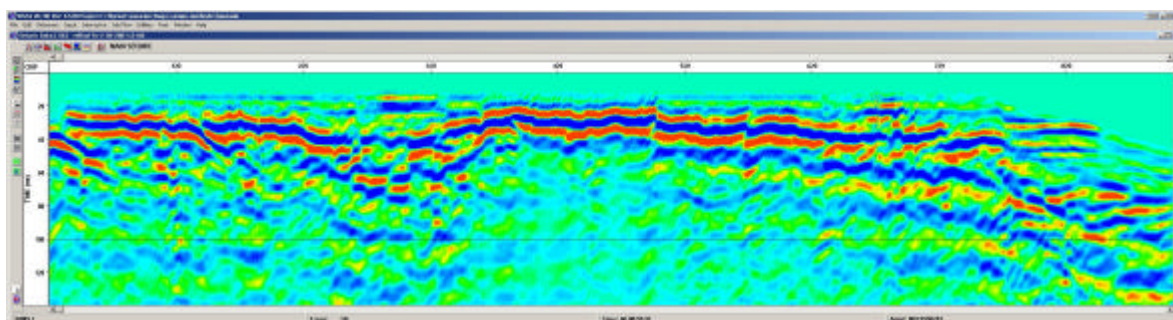


Figura 31 – seção sísmica com o dado após a aplicação do *FX prediction*, mostrada de 0ms até 150ms.

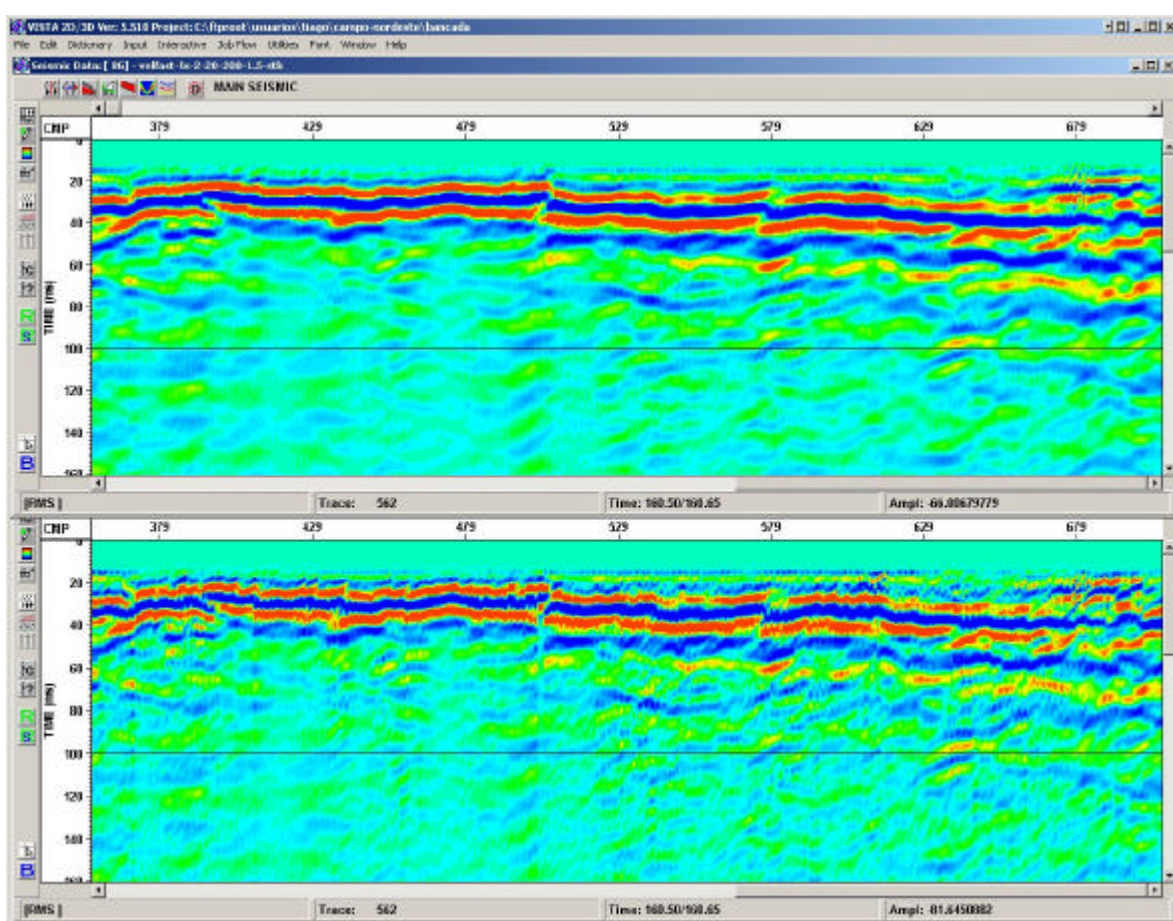


Figura 32 – visão de detalhe mostrando em cima dado com *FX prediction* e embaixo dado sem a aplicação do processo.

5.2-Processamento B

O processamento B teve como objetivo testar o mesmo processamento feito no VISTA dentro de outro programa de computador, e inserir algumas melhorias. Foi seguida a mesma seqüência de processamento, com alguns processos diferentes pelo fato do novo programa de computador usado, o PROMAX, ter um funcionamento um pouco diferenciado.

5.2.1-Preparação do dado

Da mesma forma que no A, iniciamos o processamento com o carregamento da geometria de campo, para um correto entendimento desta pelo programa de computador. Faz-se esse carregamento através de tabelas e os valores nelas contidos são levados ao *header* do dado.

Em seguida, para correção estática foi utilizado um programa externo ao PROMAX, chamado Xtatica. Este programa foi desenvolvido pela Petrobras.

Estes dois primeiros passos foram feitos por geofísicos do corpo técnico da Petrobras e não foram disponibilizadas imagens tampouco informações aprofundadas sobre seus funcionamentos.

5.2.2-Deconvolução

Seguindo a linha do processamento A, o primeiro passo de filtragem aplicado foi a deconvolução. O tipo de deconvolução usado aqui foi a primeira grande diferença entre este processamento e o A.

Outra diferença neste ponto foi a aplicação de correção de divergência esférica, que é um processo que aplica funções de ganho variável em tempo e *offset* nos traços para compensar a perda de amplitudes devido ao espalhamento da frente de ondas, ângulo de emergência, reflexão superficial e atenuação inelástica.

Diferentemente do processamento A, aqui foi usada a deconvolução de consistência superficial (aqui chamada de SCD, do inglês *Surface Consistent Deconvolution*). Este processo de deconvolução se baseia no conceito de que uma *wavelet* pode ser decomposta nas componentes de fonte, receptor, *offset* e CMP e usa qualquer combinação destas componentes para calcular o valor do espectro de energia e para deconvolução. Para dados terrestres todas as quatro componentes são normalmente usadas para decomposição, porém apenas as partes de tiro e receptor são aplicadas.

Como comprimento de operador foi usado 150ms, valor obtido em testes durante o processamento A, e o tipo de deconvolução foi a preditiva. A Figura 33 mostra o efeito da deconvolução SCD no dado.

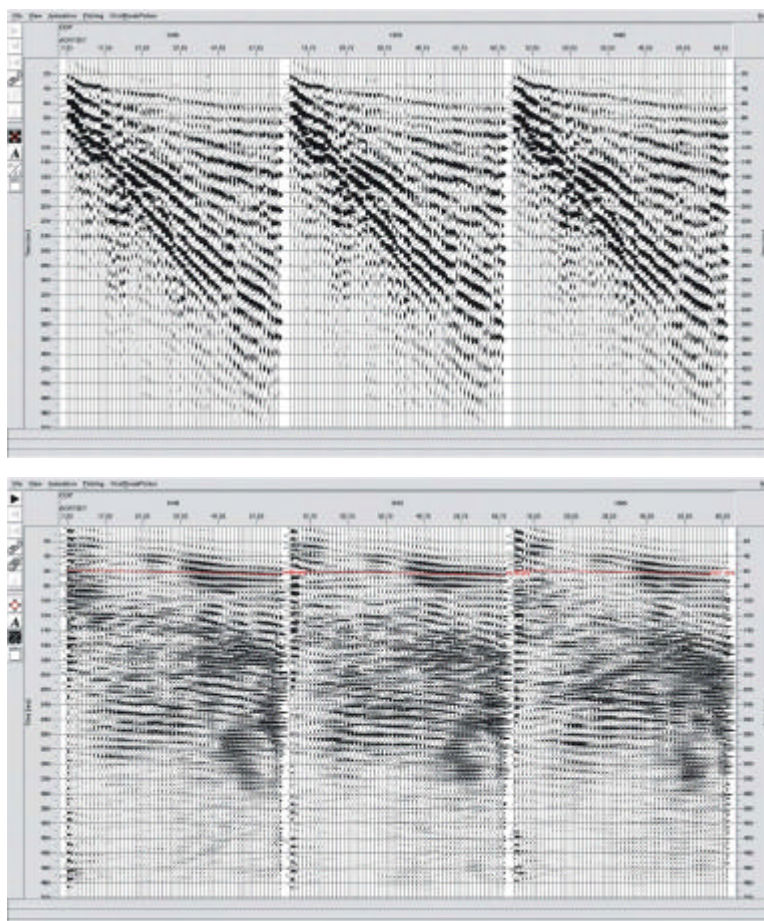


Figura 33 – CMPs mostrando a influencia da deconvolução SCD no dado. Acima dado bruto, abaixo dado com deconvolução aplicada.

Após a deconvolução foi aplicado um filtro passa banda 25-60-180-300 de forma a eliminar altas frequências geradas durante a deconvolução.

5.2.3-Remoção de ruídos de baixa velocidade

Foram usadas duas abordagens para remoção de ruídos de baixas velocidades. A primeira foi aplicação de silenciamento – *mute* – na porção de *ground roll* presente no dado. O *mute* foi aplicado no domínio do tiro (Figura 34).

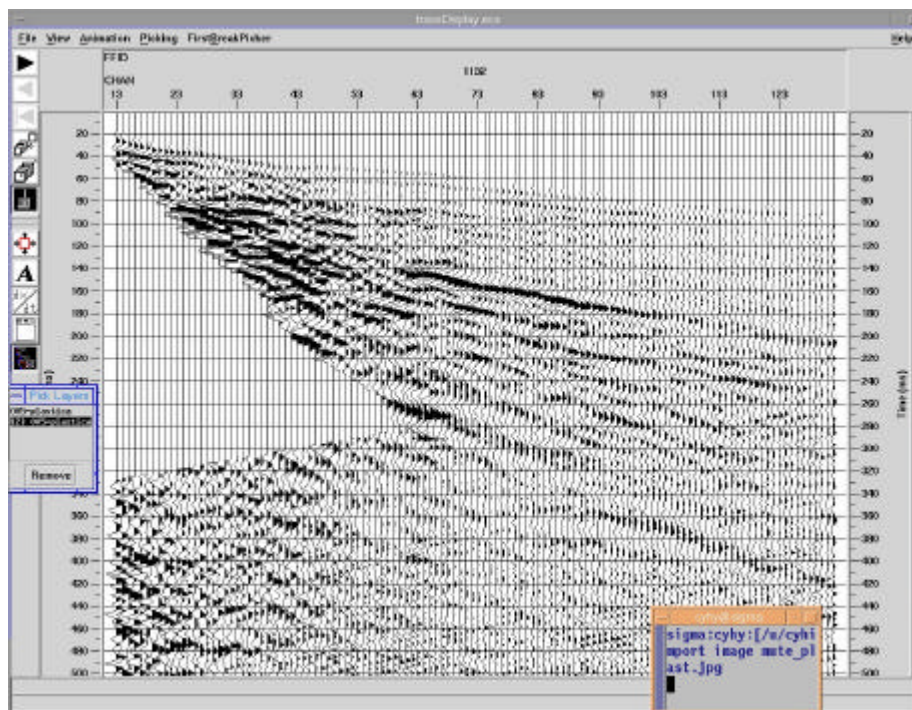


Figura 34 – tiro com *mute* aplicado.

A segunda abordagem foi a mesma do processamento A, a aplicação de filtro FK. Foi redefinido o filtro para o este processamento, não sendo usado, portanto, o mesmo do processamento A (Figura 35).

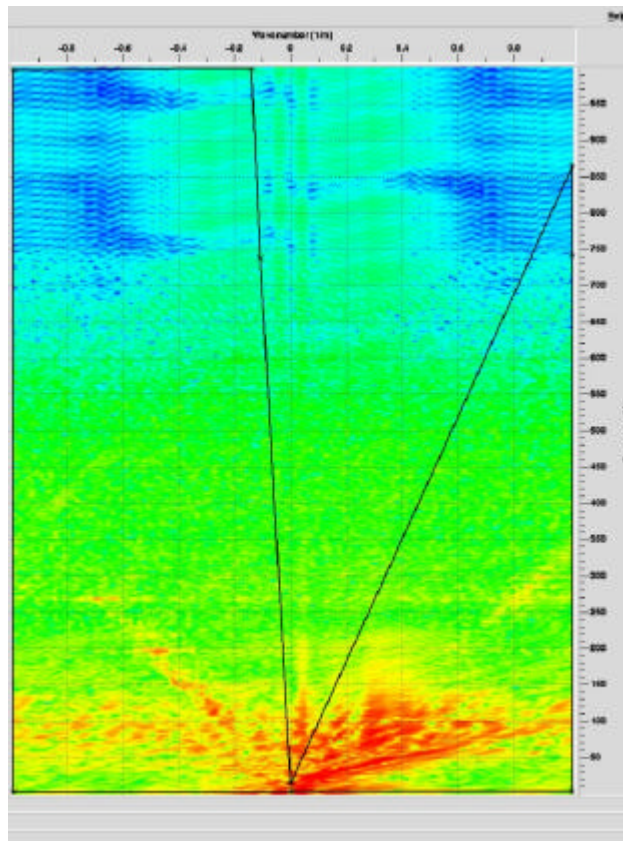


Figura 35 – espectro FK de um tiro do dado deconvolvido. O polígono desenhado é a área de rejeição do filtro.

5.2.4-Análise de velocidades

Seguindo a aplicação do filtro FK foi feita a análise de velocidades para gerar uma função de velocidades para empilhamento. Da mesma forma que o programa VISTA, o PROMAX possui uma ferramenta interativa de análise de velocidades, de forma que este passo foi feito de forma muito semelhante nestes dois ambientes diferentes.

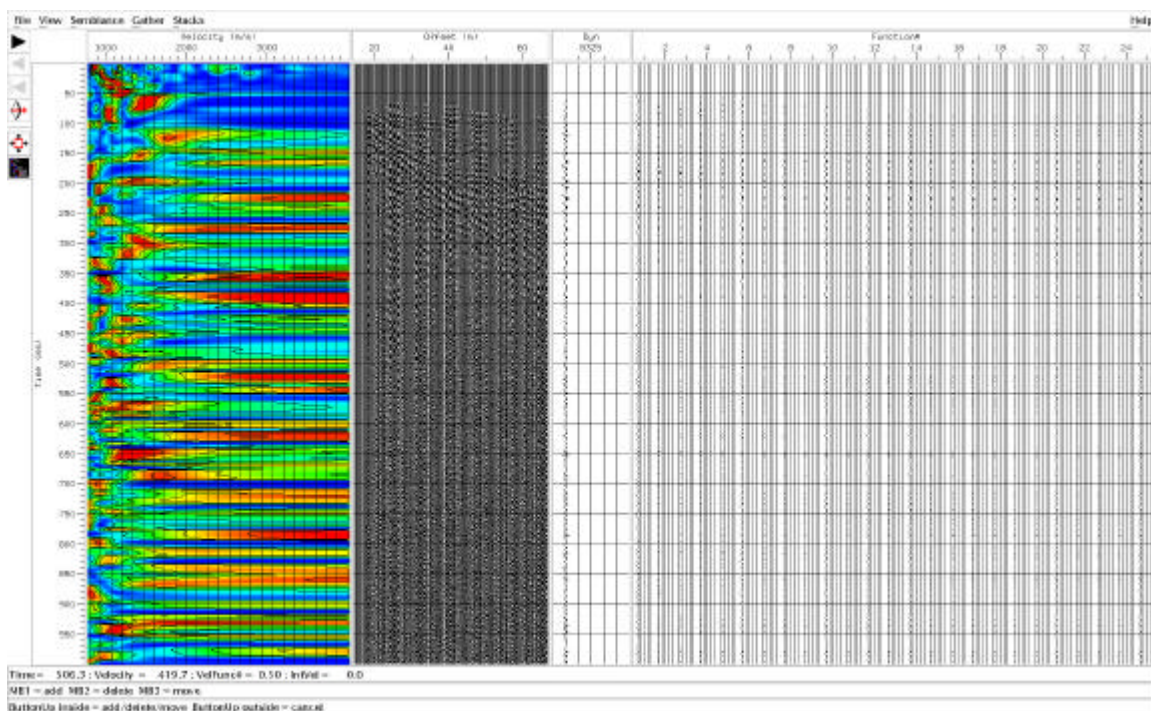


Figura 36 – ferramenta para análise de velocidades do PROMAX, muito semelhante à do VISTA.

A análise do painel de *semblance* foi de fundamental importância nessa etapa, sendo o principal referencial para definir a função de velocidades (Figura 37).

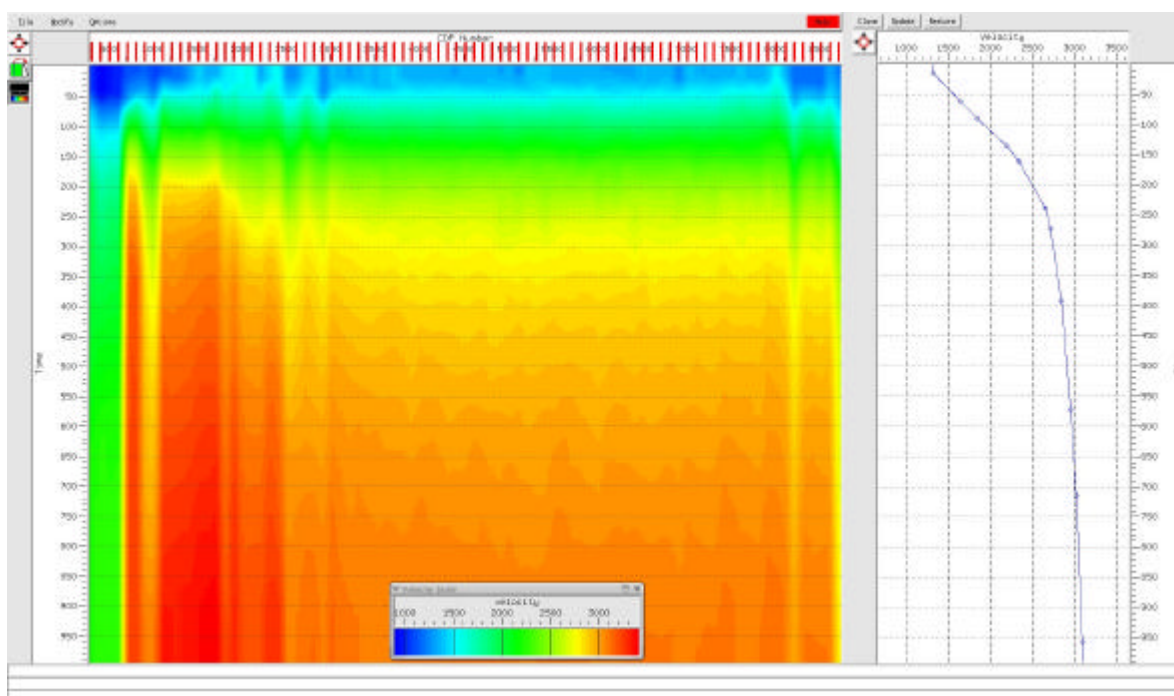


Figura 37 – Campo de velocidades definido para empilhamento.

5.2.5-Empilhamento

Trabalhar dentro do programa PROMAX é um tanto diferente do que no VISTA (Figura 38). Para empilhar o dado nesse novo ambiente foi usado uma sequência de processos um pouco mais complexa do que a utilizada anteriormente.

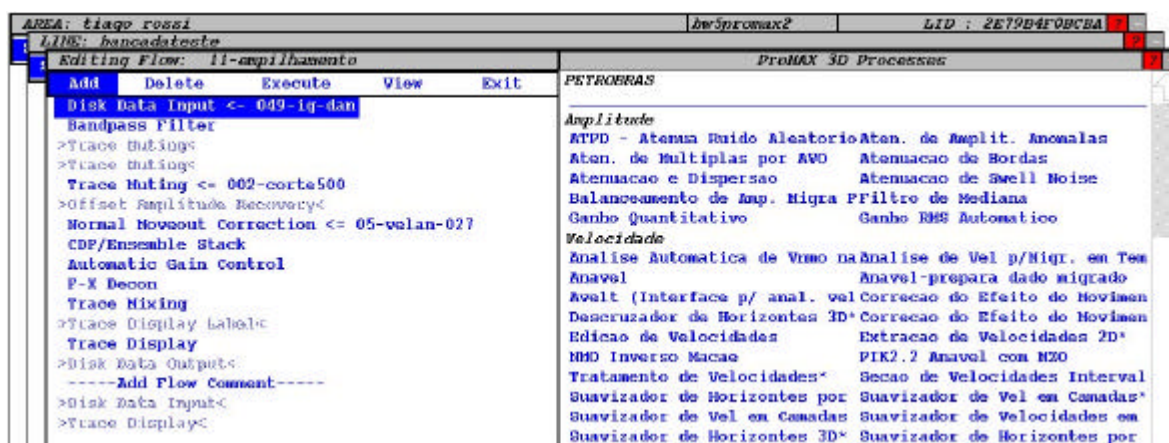


Figura 38 – tela do fluxo usado para empilhamento, dentro do ambiente PROMAX.

Foi usado um passabanda 25-60-180-300, para remover quaisquer frequências muito altas ou muito baixas. Em seguida foi aplicado um *mute* abaixo dos 500ms, sendo sabido já que abaixo deste tempo não havia nenhum evento relevante e sim apenas ruído.

No passo de NMO foi usada a função de velocidades definida durante o passo anterior de análise de velocidades, sendo em seguida usado um processo de ordenação e empilhamento do dado no domínio do CMP, seguindo a mesma linha do processamento A. Com o dado já empilhado foi ainda aplicado um AGC no tempo total do dado.

Em seguida foi aplicado um processo chamado de FX *deconvolution*, processo semelhante ao FX *prediction* aplicado no processamento A. Esse processo aplica uma transformada de Fourier em cada traço do dado de entrada. Em seguida aplica um filtro complexo unitário de predição de Wiener para cada frequência em um determinado intervalo, e aplica a transformada inversa no dado, retornando-o para o domínio do tempo.

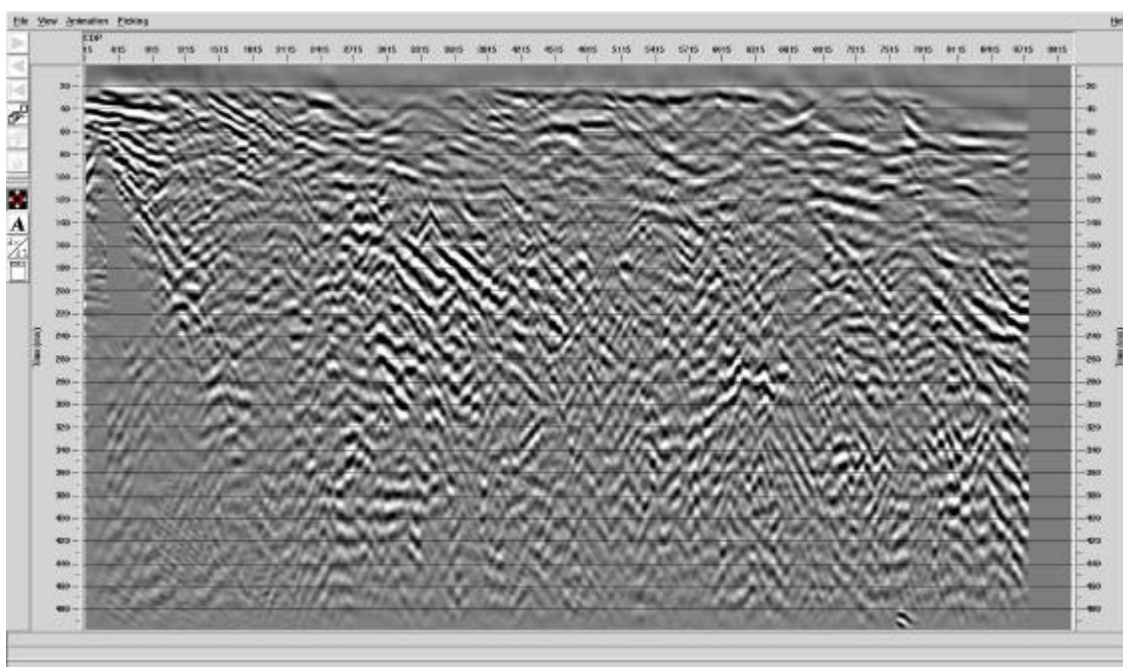
Quando o dado é convertido do domínio tempo-espço (TX) para o domínio frequência-espço (FX) qualquer fatia em tempo é convertida para uma fatia em frequência. Cada amostra do dado transformado possui componentes reais e complexos. Eventos com mergulhos similares aparecem como um sinal complexo sinusoidal em uma fatia em frequência. Ou seja, eles podem ser descritos na forma $\cos wt + i \sin wt$, sendo esse sinal passível de predição. Neste processo, um filtro complexo de predição é usado para prever o sinal um traço à frente, na mesma fatia em frequência. Quaisquer diferenças entre a forma de onda prevista e a real podem ser classificadas como ruído e removidas. Na prática esse filtro é corrido em um sentido através dos traços e em seguida no outro sentido. Para reduzir erros o resultado obtido é equalizado através de uma média.

A seção em tempo é dividida em seções menores – janelas – para melhor aproximar a premissa de mergulho linear constante. Usando uma sobreposição de janelas igual ao comprimento do filtro de predição reduz erros por efeitos de bordas, porque assegura que mesmo o primeiro e o ultimo traço das janelas tem filtros de predição com comprimentos completos em ambas as direções, com exceção do início e final do dado. O resultado desse processo é um dado com menos ruído aleatório.

Em seguida foi aplicado um *trace mixing* balanceado. Este processo multiplica horizontalmente as amostras dos traços dentro de uma janela de filtragem por pesos estabelecidos, e então as soma e normaliza esta soma de amostras acumuladas e balanceadas pela soma dos pesos.

Esse fluxo de empilhamento foi usado nesse processamento B e também no C. Dele saíram neste ponto duas seções empilhadas, uma utilizando a filtragem FK e outra o *mute*.

A)



B)

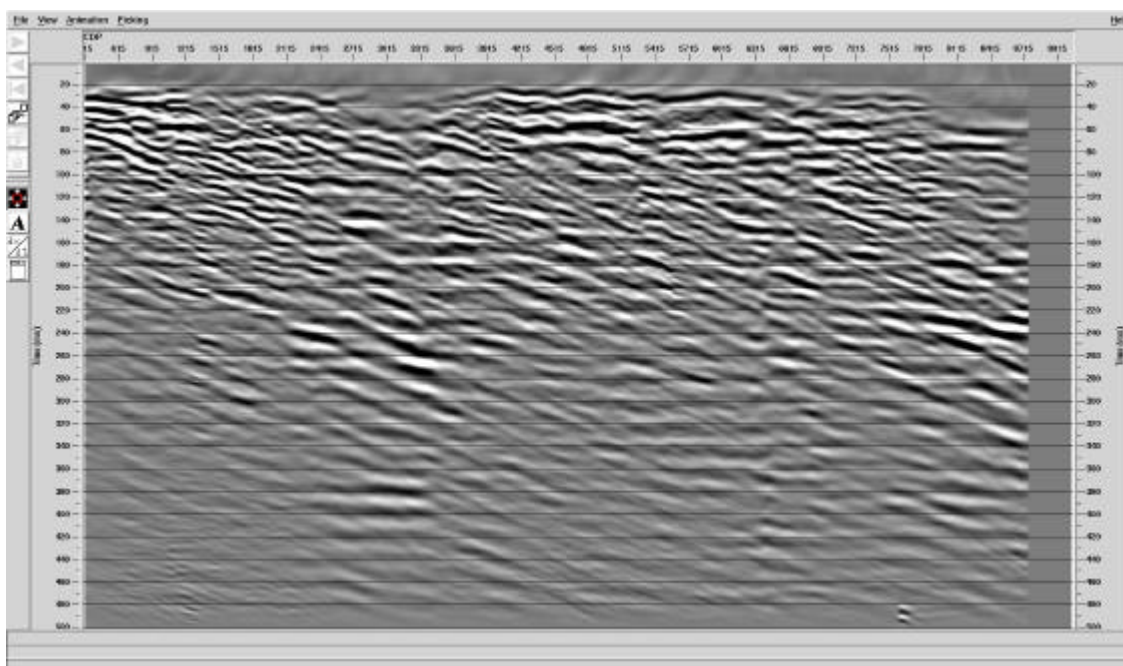


Figura 39 – seções empilhadas do processamento B. A) seção empilhada do dado com *mute*; B) seção empilhada do dado com filtragem FK.

5.3-Processamento C

O processamento C foi adotado para testar resultados de aplicação de um outro tipo de filtragem para reduzir a influência de ruídos lineares de baixa velocidade

associados ao *ground roll*. Para isso o *radial filter* foi indicado pelo corpo de geofísicos da Petrobras.

Foi dado início a este processamento com o dado já com geometria e correção estática proveniente do processamento B, uma vez que foram feitos dentro do ambiente do mesmo programa de computador.

5.3.1 Deconvolução

Com o dado já preparado pelo processamento anterior, demos início à etapa de deconvolução. O tipo de deconvolução aplicado neste processamento foi um chamado deconvolução *wavelet*. É um processo implementado no ambiente PROMAX pela equipe da Petrobras, e possui seu algoritmo fechado, não sendo possível controlar muitos parâmetros nem entender por completo seu funcionamento. Ele insere uma *wavelet* de alta frequência no dado e comprime este, deixando-o com melhor definição (Figura 40).

Aqui, da mesma forma que no processamento B, foi aplicada antes da deconvolução uma correção de divergência esférica e após a deconvolução um filtro passa banda de 25-60-180-300.

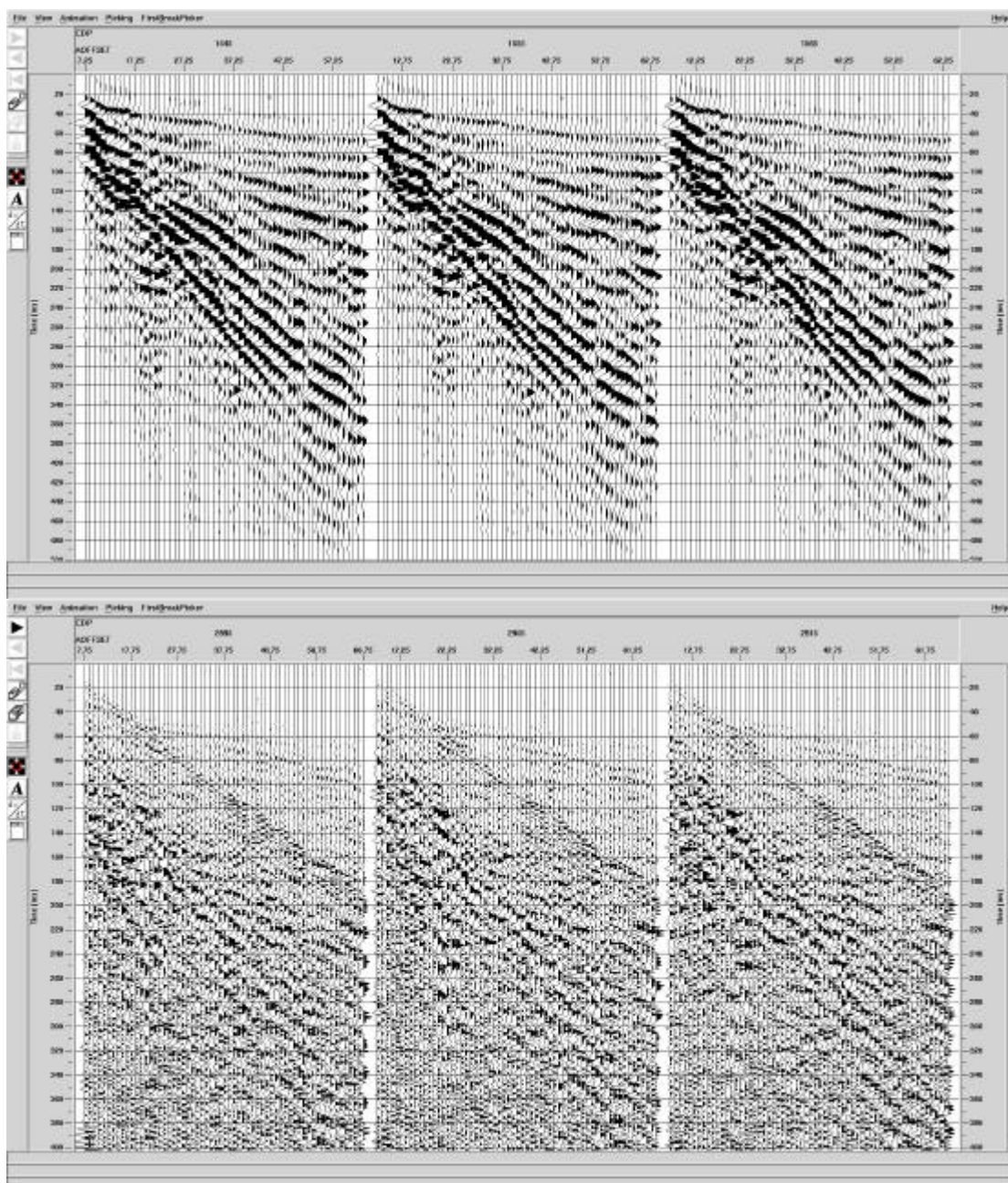


Figura 40 – acima CMPs do dado bruto, abaixo os mesmos CMPs do dado após a deconvolução *wavelet*.

5.3.2-Remoção de ruídos de baixa velocidade

Com o dado deconvolvido seguiu-se para a filtragem para redução de ruídos de baixa velocidade. Para esse fim foi aplicado um fluxo cujo principal filtro era o *Radial*

filter. Esse filtro leva o dado do domínio TX tradicional para o domínio RT, de traços radiais.

A transformada para o domínio radial – RT – é um remapeamento do dado sísmico do domínio TX, ordenado por coordenadas de distância da fonte para o receptor e tempo duplo, para um domínio de velocidade aparente e tempo duplo. Traços nesse domínio possuem a mesma origem e, portanto, são radiais em relação a essa origem. Devido ao fato da transformada radial ter as mesmas coordenadas de tempo do dado no domínio XT, a operação dessa transformada é implementada na forma de uma interpolação simples de amostras de traços em fatias em tempo no domínio XT para fatias em tempo do domínio RT. Um importante efeito da transformada do dado sísmico para o domínio RT é que eventos lineares que tem velocidade aparente e origem em comum com aquelas de trajetórias de traços radiais tem suas frequências aparentes drasticamente reduzidas no domínio RT, enquanto eventos como reflexões, que não compartilham velocidades aparentes e origem com nenhum traço radial, não são afetados. A simples aplicação de um filtro corta baixas aos traços radiais vai atenuar em grande parte os eventos lineares (tipicamente ruídos gerados pela fonte) em relação ao resto da energia sísmica presente nos traços. Da mesma forma um filtro passa baixas vai aumentar esses eventos lineares reduzindo a porção de mais altas frequências (tipicamente reflexões).

Para aplicar esse filtro submeteu-se o dado antes a um filtro passa banda para realçar altas frequências 72-96-187-200. O resultado é um dado com pouca influência de ruídos lineares de baixa velocidade (Figura 41).

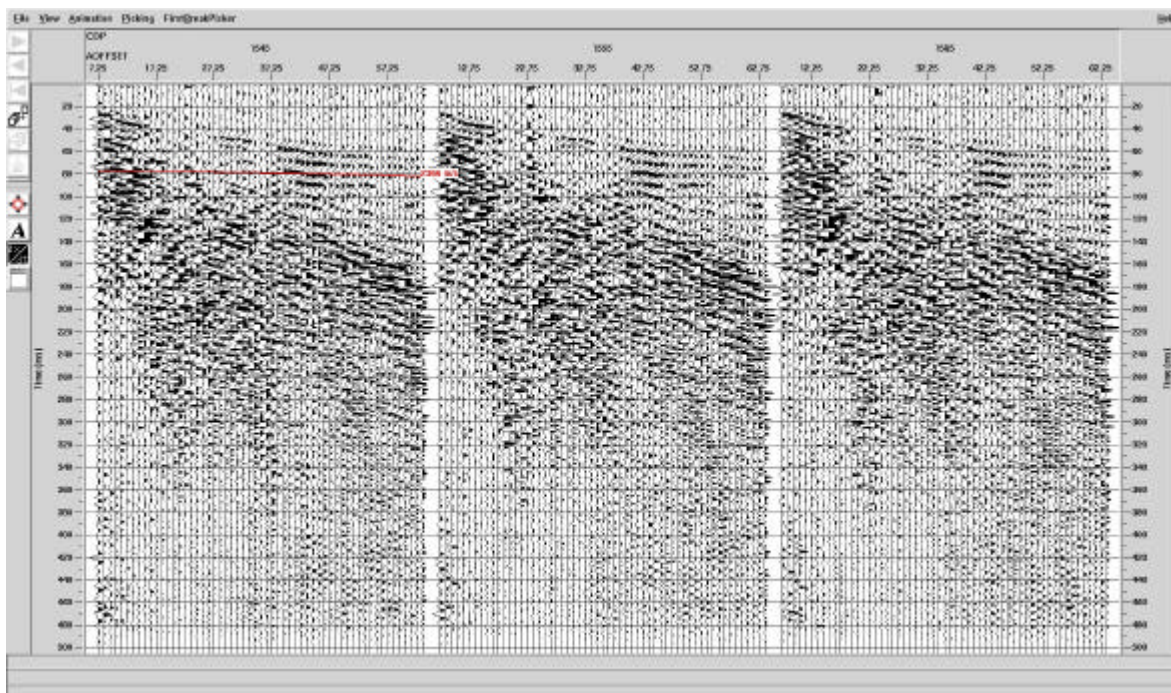


Figura 41 – CMPs com dado pós-deconvolução e *radial filter* aplicado.

5.3.3-Análise de velocidades

Neste processamento foi utilizada a mesma função de velocidades definida no processamento passado.

5.3.4-Empilhamento

Foi usado o mesmo fluxo de empilhamento do processamento B. Assim aqui pôde-se obter uma seção (Figura 42) facilmente comparável com as obtidas no processamento anterior.

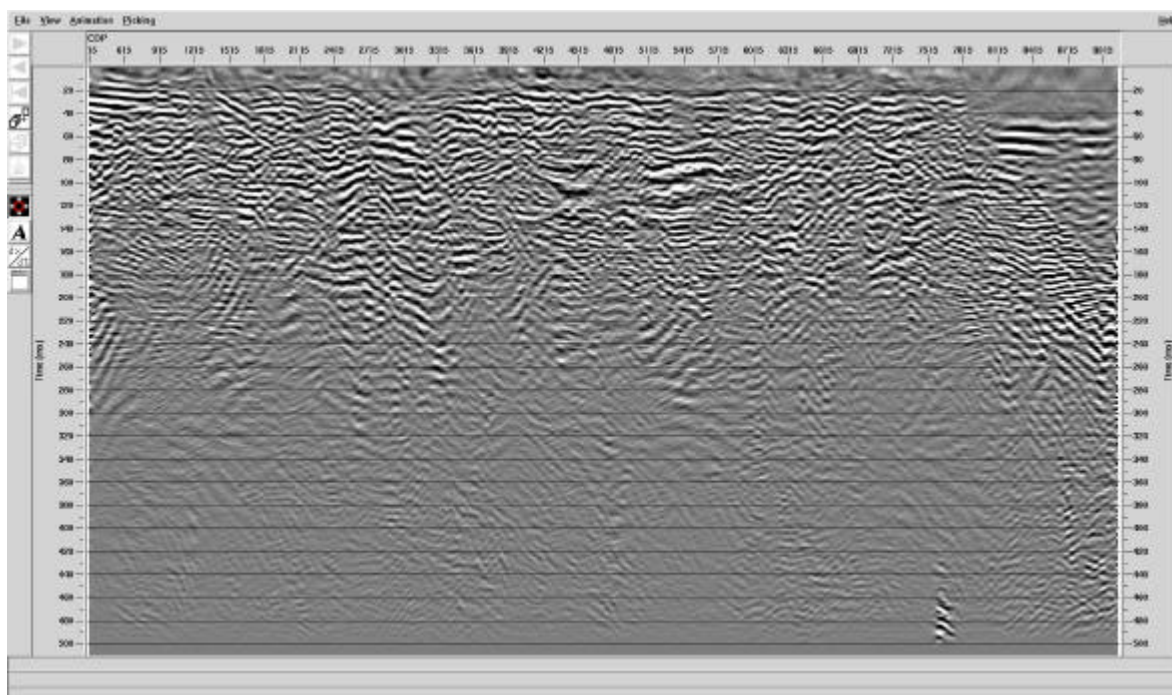


Figura 42 – seção empilhada obtida ao final do processamento C.

6-Discussão de dados

A geometria de campo usada para o levantamento não surtiu o efeito desejado de se obter uma imagem de alta resolução onde se observassem topo e base de camadas com dimensões métricas e geometrias lenticulares. Enquanto o curto Ie permitiria uma melhora na resolução do dado adquirido, este acabou por tornar a separação de ruído e sinal muito complexa. Todos os eventos estavam muito próximos no sismograma, ficando muitas vezes misturados, tornando sua individualização e identificação para melhor filtragem bastante difícil. O arranjo *end-on* usado dificultou ainda mais a identificação de possíveis refletores, sendo que apenas um dos lados das hipérboles poderiam ser observados. Dentro do que é possível fazer com o equipamento disponível, seria melhor usar um Ie maior e um arranjo *split-spread* simétrico, espalhando de forma mais eficiente os geofones em campo, mas tendo em mente que não se obteria a mesma resolução. Outra melhoria seria a geração de uma seção sísmica sintética a partir da inversão de dados obtidos em afloramento, previamente à etapa de campo. Isso possibilitaria uma melhor parametrização de campo e conseqüentemente uma melhor aquisição.

Com três processamentos diferentes feitos a partir do mesmo dado de campo puderam-se tecer alguns comentários sobre a eficácia dos processos aplicados, dentro do que foi proposto que cada processo fosse vir a resolver.

Todos os processos aplicados para remoção de ruídos lineares relacionados ao *ground roll* tiveram alguma eficácia, porém o que mais se mostrou efetivo foi o *radial filter*. A partir de comparação de seções observa-se que este filtro removeu os ruídos lineares relacionados ao *ground roll* de forma eficiente e sem gerar grandes efeitos no dado.

Dos processos de deconvolução aplicados, a deconvolução *wavelet* foi a que proporcionou uma maior melhora na resolução do dado ao final do processamento. A comparação fica mais evidente entre os processamentos B e C, que tiveram quase o fluxo inteiro feito em conjunto, sendo apenas os passos de deconvolução e de redução de ruídos lineares sido feitos separados.

A Figura 31 resultado do processamento A mostra um dado com pouco ou nenhum evento mergulhante incoerente, porém não foi eficiente na eliminação de ruídos

nos offsets próximos e os fortes eventos presentes nela são apenas onda refratada mal filtrada.

Dentre as Figuras 39 A e B, opta-se pela B como melhor. O *mute* aplicado na A provocou perda de dado muito grande, sendo assim o FK aplicado na B mais eficiente. Observam-se feições bem marcadas em B que não são observadas na seção A.

Já o empilhamento resultante do processamento C (Figura 42) mostra uma boa melhoria na resolução, mostrando que a deconvolução aplicada funcionou bem dentro do que se propôs fazer.

Descartando o resultado do processamento A, restam duas seções, uma vez que dos dois resultados do processamento B apenas o que teve filtro FK aplicado será considerado. Destas duas seções, a que apresenta melhor resolução e menos efeitos de eventos lineares é a obtida após o processamento C. Isso se deu devido à grande eficiência do *radial filter* e da deconvolução *wavelet*.

Mesmo tendo a seção resultante do processamento C uma boa melhoria na resolução, fica difícil a identificação de refletores que possam vir a ser relacionados com a geologia subjacente (Figura 43). Eventos observados na porção mais rasa (até 100ms) da seção sísmica mostrada na Figura 43 poderiam ser relacionados a algumas das lentes de folhelho observadas no campo.

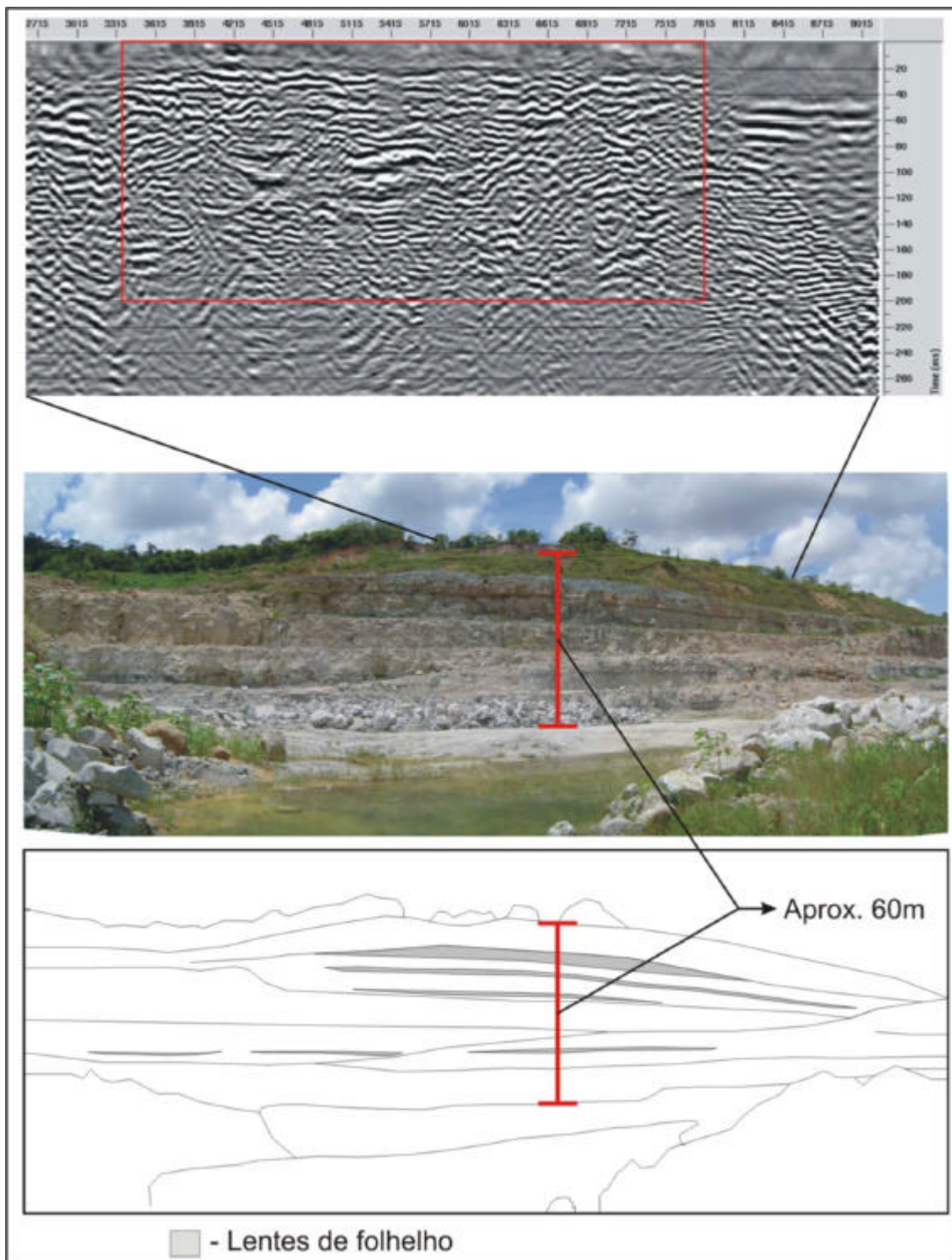


Figura 43 – figura mostrando seção sísmica (acima), a foto da bancada sobre a qual a linha aqui processada foi adquirida (meio) e um desenho esquemático indicando a posição de lentes de folhelho (abaixo).

7-Conclusões

Os objetivos propostos foram cumpridos, na questão de se adquirir diversas linhas de sísmica de reflexão de alta resolução na área de estudos em questão.

A técnica geofísica de sísmica rasa foi extensivamente posta em prática, tanto na parte de aquisição de dados quanto no processamento. Durante a permanência no curso de mestrado um curso ministrado pela Petrobras sobre aquisição geofísica foi de grande importância para o aprimoramento nessa área, especialmente contribuindo para uma melhoria técnica no projeto SPHERA.

Foram gerados novos dados importantes que servirão de subsídio para estudos de modelagem em rochas carbonáticas e também como parte importante em estudos multi-escala de integração de dados.

Esses novos dados gerados serão comparados a dados já levantados pela equipe. Essa comparação é importante no entendimento de problemas existentes nos dados mais antigos e conseqüentemente no encontro de soluções para os mesmos através de um melhor processamento.

Percebeu-se que os parâmetros de campo não foram ideais para o levantamento gerando alguns problemas que já eram encontrados e ainda não foram resolvidos por completo pela equipe da UFPR. Esse fato tornou o processamento dos dados mais complexo e uma correlação eficiente da seção final com a geologia se tornou difícil.

Mesmo aplicando-se o atual estado da arte de tecnologia de aquisição e processamento de sísmica rasa de alta resolução, ainda assim se torna difícil a correlação da seção final com a geologia. Isso se deve especialmente à falta de uma etapa de correlação de velocidades sísmicas com a estratigrafia da região.

A comparação entre os fluxos de processamento usados aqui foi uma ferramenta importante em definir a eficiência dos processos aplicados.

8-Referências Bibliográficas

Appi, C.J. e Rostirolla, S.P., 2004, Modelagem da anisotropia em sistemas fraturados a partir de estudos de alta resolução na Bacia do Paraná, Brasil. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 12, n. 1, p. 125-147, nov.2003/maio2004.

Brunetta, R.; Lonardelli, J. N.; Rigoti, A.; Rostirolla, S. P.; Appi, C. J. 2004. Resultados preliminares do processamento de dados de sísmica rasa em rochas fraturadas do Grupo Itararé. In: SBGf, Simpósio Regional da SBGf, 1, São Paulo, SBGf. CD.

Brunetta, R. 2005. O processamento da sísmica de reflexão rasa – Desafios encontrados no estudo de modelos análogos a reservatórios fraturados. Dissertação de mestrado, UFPR. 85p.

Campos, A.F. de, Rigoti, A., Rostirolla, S.P., Appi, C.J., Kraft, R.P., Bartoszeck, M.K. 2003. Eletorresistividade como apoio à caracterização de arenitos fraturados. In: SBGF, In: International Congress of The Brazilian Geophysical Society, 8, Rio de Janeiro, SBGf. CD.

Feijó, F. J. 1994. Bacias de Sergipe e Alagoas. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v.8, n°.1, p. 149-161.

Lana, M. C. 1990. Bacia de Sergipe-Alagoas: Uma Hipótese de EVOLUÇÃO Tectono Sedimentar. Origem e Evolução das Bacias Sedimentares. PETROBRÁS. Rio de Janeiro, p311-332.

Lonardelli, J.N. do; Rigoti, A.; Rostirolla, S.P.; Appi, C.J.; Brunetta, R. 2003. Ensaios sísmicos de reflexão rasa em rochas fraturadas do Grupo Itararé. In: International Congress of The Brazilian Geophysical Society, 8, Rio de Janeiro, SBGf. CD.

Lonardelli, J. N. 2004. Ensaios sísmicos de reflexão rasa em rochas fraturadas do Grupo Itararé, Bacia do Paraná. Dissertação de mestrado, UFPR. 88p.

Stone, D. G. 1994. Designing seismic surveys in two and three dimensions. Society of Exploration Geophysicists. 244p.

Ven, P. H. V. D.; Cainelli, C.; Fernandes, G. J. F 1989. Bacia de Sergipe-Alagoas: Geologia e Exploração. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v.3, n°4, p. 307-319.

Wang, F.P., Lucia, F.J., e Kerans, C., 1998a, Modeling dolomitized carbonate ramp reservoirs: A case study of the semihole San Andrés unit – Part I, petrophysical and geologic characterizations. Geophysics, 63, p. 1866-1875.

Wang, F.P., Dai, J., e Kerans, C., 1998b, Modeling dolomitized carbonate ramp reservoirs: A case study of the semihole San Andres unit – Part II, seismic modeling, reservoir statistics, and reservoir simulation. Geophysics, 63, p. 1876-1884.

Yilmaz, O. 2001. Seismic data analysis – Proceesing, inversion and interpretation of seimic data. Society of Exploration Geophysicists. v.1, 1000p.

Ziolkowski, A. 1984. Deconvolution. Kluwer Academic Publishers Group, 175p.